



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Edificació
de Barcelona

ENGINYERIA EN GEOMÀTICA I TOPOGRAFIA

TREBALL DE FI DE GRAU

TÈCNIQUES 3D EN LA DOCUMENTACIÓ DE TREBALLS ARQUEOLÒGICS: COVA CAN SADURNÍ, BEGUES

Projectista: Jordi Segarra Moya

Directora: María Amparo Núñez Andrés

Codirector: Felipe Buill Pozuelo

Convocatòria: Setembre de 2018

SUMMARY¹

For some time now, massive data capture systems (SCM), both image and laser-based, are being developed along with the evolution of digital technology while they are spreading in more and more areas. The increasing capacity of processing of personal computers, the appearance of new calculation algorithms, the refinement of capture and measurement devices and, in general, the reduction of technological products costs make these systems increasingly accessible and are therefore being applied in several disciplines.

In the field of archaeology, documentation of excavation processes is a critical point since these involve the dismantling of the site itself. The only possibility to check and verify the data or reinterpret the results of an excavation consists of, almost exclusively, reviewing the documentation that was carried out at the time, as reexcavation becomes impossible.

Just from the beginning of archaeological practice as a scientific discipline the graphic documentation, in the form of drawings (plans, cross sections and details) or photographs, and the recording of the spatial distribution of the findings (initially with grid methods) have been considered of outstanding importance. Geomatics has been providing topographic techniques in the spatial record of the elements and characteristics of the sites for a long time.

SCMs represent a new and valuable complementary tool to these sorts of documentation. The migration of the photogrammetric processes to the digital world and the development of increasingly accurate, efficient and flexible laser measurement devices make it possible to create three-dimensional digital photorealistic models that gather accurate graphic and geometric reproduction, which are referenced to their original location. This allows to reproduce different excavation states of the site when findings have already been removed and to review the original position and context of the different localized findings, with the possibility to extract coordinates and perform measurements. This removes disadvantages as the restriction of a fixed representation scale, using a single point of view, or selecting some details over others.

It's well known that archaeological teams use to work with very restrictive budgets, and this work aims at seeking ways of using SCM as affordable as possible, to show that any archaeological project, no matter how modest it is, can integrate them in its documentation processes. This work is focused on image-based SCM as they have become the most accessible ones since they do not depend on expensive and specialized equipment any more and they have taken advantage of the emerging low-cost or even free software.

In this work, we have evaluated several currently available resources, mainly image-based systems, all of them with different features and limitations and with origins from both the commercial sector and the academic or research field. To do this, a practical application has been carried out in real conditions at the archaeological site of Can Sadurní, in Begues, which has allowed us to see how these SCM solutions work and the results obtained. The intention is to build an image of the current state of availability of these systems, focusing on the fact that they should be as accessible and affordable as possible, both in terms of economy and usability for the sake of maximum integration in the archaeological methodology.

¹ Versió en català d'aquest capítol a l'ANNEX 1 - .

ÍNDEx

SUMMARY	3
ÍNDEx	5
GLOSSARI	11
1. INTRODUCTION	13
2. GRAPHIC DOCUMENTATION IN ARCHAEOLOGY	15
3. ARCHAEOLOGY AT GARRAF	17
3.1. CAN SADURNÍ CAVE	17
4. MASSIVE DATA CAPTURE SYSTEMS	21
4.1. IMAGE-BASED METHODS	21
4.1.1. Close Range Photogrammetry (CRP)	22
4.1.2. Structure from Motion (SFM)	23
4.2. METHODS BASED ON LASER MEASUREMENTS	24
4.2.1. Triangulation	25
4.2.2. Time-of-flight	25
4.3. IMAGE-BASED DATA PROCESSING METHODS	26
4.3.1. CRP	27
4.3.2. SFM	27
4.3.3. Eines utilitzades	29
4.3.3.1. Image Master	29
4.3.3.2. Photoscan Pro i Photoscan Standard	30
4.3.3.3. Visual SFM	31
4.3.3.4. Regard3D	32
4.3.3.5. Arc3D	33
4.3.4. Mètodes basats en mesures làser	34
4.3.4.1. Estació Híbrida Topcon IS-203	34
4.3.5. Eines complementàries de processat de núvols de punts i malles	35
4.3.5.1. Meshlab	35
4.3.5.2. Cloud Compare	36
5. TREBALLS REALITZATS	37
5.1. ZONA DE SITGES	37
5.1.1. Captura d'imatges	38
5.1.1.1. Càmera	38
5.1.1.2. Presa d'imatges	38
5.1.1.3. Punts de referència	40
5.1.2. Processat de dades	41
5.1.2.1. Maquinari	41
5.1.2.2. Dades	41
5.1.2.3. Programari: Image Master	41
5.1.2.4. Programari: Photoscan	45
5.1.2.5. Programari: VisualSFM + Meshlab + CloudCompare	48
5.1.2.6. Programari: Regard3D	51
5.1.2.7. Programari: Arc3D	55
5.1.3. Resultats, comparació i conclusions	57
5.1.3.1. Resultats obtinguts	57
5.1.3.2. Comparació Photoscan Pro – Image Master	58
5.1.3.3. Comparació Photoscan Pro – Photoscan Standard	59
5.1.3.4. Comparació Photoscan Pro – VisualSFM:	59

5.1.3.5.	Photscan Pro – Regard3D.....	60
5.1.3.6.	Conclusions zona de sitges	60
5.2.	INTERIOR COVA	61
5.2.1.	Mesures làser	61
5.2.1.1.	Estació Híbrida + Image Master	61
5.2.1.2.	Escàner Làser Faro	63
5.2.2.	Captura d'imatges.....	64
5.2.2.1.	Càmera i presa d'imatges	64
5.2.2.2.	Punts de referència.....	65
5.2.3.	Processat de dades	66
5.2.3.1.	Photscan Standard	66
5.2.3.2.	VisualSFM.....	67
5.2.3.3.	Regard3D.....	67
5.2.4.	Comparació i conclusions	68
5.2.4.1.	Comparació escàner làser - estació híbrida	68
5.2.4.2.	Comparació escàner làser – Photscan.....	69
5.2.4.3.	Conclusions interior cova	71
6.	CONCLUSIONS.....	73
7.	BIBLIOGRAFIA	75
	AGRAÏMENTS	77
	ANNEXOS	79
ANNEX 1 –	Versió en català del Resum i Capítols 1 - 4	81
RESUM.....		81
1.	INTRODUCCIÓ	83
2.	DOCUMENTACIÓ GRÀFICA EN ARQUEOLOGIA	85
3.	ARQUEOLOGIA AL GARRAF	87
3.1.	La Cova de Can Sadurní.....	87
4.	CAPTURA MASSIVA DE DADES	91
4.1.	MÈTODES BASATS EN LA IMATGE	92
4.2.	MÈTODES BASATS EN MESURES LÀSER	95
4.3.	PROCESSAMENT DE DADES	96
ANNEX 2 –	Calibratge de càmera (Image Master Calib)	99
ANNEX 3 –	Coordenades i situació de punts de recolzament a zona de sitges.	101
A3.1.	Coordenades de punts de recolzament:	101
A3.2.	Situació:	101

ÍNDEx D'IL·LustrACIONS

Il·lustració 3-1. Location of Can Sadurní archaeological site in the municipality of Begues (font ICGC).....	18
Il·lustració 3-2. Can Sadurní cave: In the first place, the terrace, with the sitges on the right, and the current entrance to the bottom.....	19
Il·lustració 3-3. Can Sadurní cave: guided tour to the inner part of the archaeological site.....	20
Il·lustració 4-1. Working schema of a triangulation laser scanner, from (16).	25
Il·lustració 4-2. Examples of terrestrial laser scanner (ELT)	26
Il·lustració 4-3. Image Master, de la casa Topcon.....	29
Il·lustració 4-4. Photoscan (versió Standard): pantalla d'inici.	30
Il·lustració 4-5. VisualSFM, amb imatges carregades i executant l'algoritme de detecció de punts comuns SIFT.....	31
Il·lustració 4-6. Regar3D: pàgina web amb la documentació per a cada pas.....	32
Il·lustració 4-7. Arc3D, pàgina web d'accés al servei i guia d'ús.	33
Il·lustració 4-8. Estació híbrida Topcon IS-203 en procés d'escanejat.	34
Il·lustració 4-9. Meshlab.....	35
Il·lustració 4-10. Cloud Compare	36
Il·lustració 5-1. Sitges, estat previ a l'acondicionament i presa de fotografies	37
Il·lustració 5-2. Composició panoràmica de passada de 10 imatges quasi-vertical des de la passarel·la existent (visible a la part inferior).....	38
Il·lustració 5-3. Composició panoràmica de passada de 8 imatges obliqua.	38
Il·lustració 5-4. Disposició de les 48 imatges utilitzades en els processats SFM.....	39
Il·lustració 5-5. Disposició de les 21 imatges utilitzades per al processat d'Image Master	39
Il·lustració 5-6. Fragment d'imatge, amb 3 punts de control visibles	40
Il·lustració 5-7. Image Master Calib, patró imprimible per a fotografiar.....	42
Il·lustració 5-8. Image Master: mesura de punts de control sobre les imatges.....	43
Il·lustració 5-9. Image Master: parell d'imatges orientat amb polilínia de delimitació per a creació de malla (esq.) i resultat, en cian (drt.).....	43
Il·lustració 5-10. Image Master. Malles triangulars generades per cada parell d'imatges.	44
Il·lustració 5-11. Topcon Image Master: model acabat amb malla, punts de control, textura i corbes de nivell.....	44
Il·lustració 5-12. Photoscan: màscara en foto i exportació d'aquesta en arxiu d'imatge.	45
Il·lustració 5-13. Photoscan Pro, georeferenciació. Assistència en l'assignació de punts de recolzament (esq.) i model georeferenciat.	46
Il·lustració 5-14. Photoscan. Exemples de quadres de diàleg de paràmetre.	46
Il·lustració 5-15. Photoscan Standard: Processat de la malla.	47
Il·lustració 5-16. Photoscan Standard: Georeferenciació a CloudCompare	47
Il·lustració 5-17. VisualSFM: Controls i passos bàsics (extret de la web de l'autor) ..	48
Il·lustració 5-18. VisualSFM: Reconstrucció 3D i càlcul de posició i paràmetres de càmeres	49
Il·lustració 5-19. Meshlab, malla i selecció de triangles sobrats amb eina de selecció segons longitud d'arestes.....	50
Il·lustració 5-20. CloudCompare, georeferenciació del model VisualSFM	51

Il·lustració 5-21. Regard3D: Finestra de paràmetres per al càlcul de punts comuns entre imatges amb els paràmetres utilitzats.....	52
Il·lustració 5-22. Regard3D: Finestra de paràmetres per a la triangulació de la posició de càmeres, amb els paràmetres utilitzats.	52
Il·lustració 5-23. Regard3D: resultat de densificació del núvol de punts..	53
Il·lustració 5-24. Regard3D, finestra de generació de superfície, amb els paràmetres utilitzats.	54
Il·lustració 5-25. Regard 3D: Malla resultant i diferència en l'ús (drt)) de l'opció Photometric outlier removal (Gauss damping)	54
Il·lustració 5-26. Regard3D: Georeferenciació del model a CloudCompare.....	55
Il·lustració 5-27. Arc3D uploader: Controls	55
Il·lustració 5-28. Arc3D uploader: Detecció d'imatges precarregades mogudes o borroses.	56
Il·lustració 5-29. Arc3D: formulari de metadades del treball.	56
Il·lustració 5-30. Comparació Photoscan Pro – Image Master	58
Il·lustració 5-31. Comparació Photoscan Pro – Photosan Standard.....	59
Il·lustració 5-32. Comparació Photoscan Pro - VisualSFM.....	59
Il·lustració 5-33. Comparació Photoscan Pro – Regard3D	60
Il·lustració 5-34. Image Master: composició d'escanejos amb IS i exemple d'imatge extreta de la càmera de l'estació.	62
Il·lustració 5-35. Escàner làser Faro i diana de referència a l'interior de la cova.....	63
Il·lustració 5-36. Núvol de punts de l'escàner làser.....	63
Il·lustració 5-37. Photoscan Standard, intrior model cova, s'observa la interrupció de la passarel·la per efecte de les màscares en les fotografies.....	64
Il·lustració 5-38. Coordenades de punts extrems dels núvols d'escaneig per utilitzar de recolzament.	65
Il·lustració 5-39. Màscara aplicada a bastida i personal.	66
Il·lustració 5-40. Photoscan Standard: model tridimensional de la cova.	66
Il·lustració 5-41. Visual SFM, model de l'interior de la cova, molt incomplet.....	67
Il·lustració 5-42. Regard3D, model de la cova, incomplet.	67
Il·lustració 5-43. Cova, comparació escàner làser - estació híbrida, vista obliqua.	68
Il·lustració 5-44. Cova, comparació escàner làser - estació híbrida, vista zenital.	69
Il·lustració 5-45. Cova, comparació escàner làser - SFM, vista obliqua.	69
Il·lustració 5-46. Cova, comparació escàner làser – SFM,, vista zenital.	70
Il·lustració 5-47. Eina Fine Registration (ICP) aplicada als núvols d'escàner (referència) i d'imatge (a alinear) i resultat de la transformació.....	70
Il·lustració 5-48. Ajust núvols escàner i SFM mitjançant d'eina ICP, , vistes zenital i oblíqua.....	71
Il·lustració A1-0-1. Image Master Calib, informe de calibratge de càmera.	99
Il·lustració A2-0-2. situació dels punts de recolzament a la zona de sitges, sobre el model d'Image Master..	101

ÍNDEX DE TAULES

Taula 4-1. Photogrammetric Software, characteristics.	27
Taula 5-1. Sitges: característiques de presa d'imatges.....	39
Taula 5-2. Sitges: mida de píxel sobre terreny.....	40

Taula 5-3. Resultats obtinguts	57
Taula 5-4. Cova: característiques de les imatges.	64
Taula 5-5. Cova: mida màxima de píxel sobre terreny.	65
Taula 5-6. Cova: característiques dels models obtinguts.....	68

GLOSSARI

CIPAG: Col·lectiu per a la Investigació de la Prehistòria i l'Arqueologia del Garraf-Ordal (1)

CRP: Fotogrametria d'objecte proper (Close Range Photogrammetry)

ELT: Escàner Làser Terrestre

IGGC: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya

MVS: Multi-view Stereo

SCM: Sistemes de captura massiva

SFM: Structure from motion

SIFT: Scale-Invariant Feature Transform (2)

SIG: Sistema d'informació geogràfica

1. INTRODUCTION¹

Archaeology is defined at the Enciclopædia Britannica as the scientific study of the material remains of past human life and activities.

Interest in archaeology began at late XIX century. Since then, archaeology slowly developed the methodologies to extract as much information as possible from the studied sites, to convert it in knowledge, and it is at mid-XX century when these methodologies are well established that archaeology was considered a scientific discipline. One of the main tools used to extract information from remains is the site excavation. This is a destructive activity, and not repeatable by definition. But the repeatability of an experiment is one of the main features of the scientific method. This contradiction makes the documentation of the excavation process of critical importance.

The objective of excavation is to add information to the archaeological register about the set of findings appeared in the site. There are three types of elements: the artefacts (any tool of human manufacture), ecofacts (any organic remain) and structures (construction remains). It is with the interpretation of the archaeological register's data that knowledge hypothesis can be done to explain the facts and conditions of the past.

This data will also feed the archaeological registers of other sites that share space or time, and it's usual that, after new findings, data need to be reviewed, the same site or other with similar characteristics might need to be reinterpreted, and that's why the documentation of excavation works is fundamental, because, as mentioned, the sites are destroyed during the excavation process and it's not possible to reexcavate.

To capture as much information as possible, archaeologists collaborate with specialists in different subjects, who can extend the sources and complement the context archaeological data with the knowledge of their respective areas.

From the moment that first scientific methodologies are implemented, the spatial distribution of the findings was considered of interest and its annotation began, originally with the grid method of Wheeler (1930). This method of recording evolved with the methods of Laplace-Meroc (1954, the most extended), Van Giffen (1958) and, more recently, the Harris matrix method (1975-80, very extended nowadays). More recently, the use of topographic total stations was widely extended to position the findings that appear during excavations, often as a complementary tool to the grids, but also as an independent tool, adding more flexibility during excavation.

Geomatics has been adding new tools to the elaboration of the archaeological register (and other related applications) due to the irruption of new technologies and the evolution of digital world. Now creating georeferenced 3D models (which include laser scanner or image-based measurements) has become simpler and more affordable. They complement the

¹ Versió en català d'aquest capítol a l'ANNEX 1 - .

documentation of the excavation process, its further analysis and contribute to the creation of dissemination media. Anyway, including these technologies is usually slow. As said, archaeology works with lots of different scientific fields and all of them are constantly evolving.

This work tries to apply and spread some digital three-dimensional reproduction techniques on the excavation activity, searching for methodologies as simple and affordable as possible, and showing its use with a practical application to systematize their use in the tasks of creating the registry.

2. GRAPHIC DOCUMENTATION IN ARCHAEOLOGY¹

As presented so far, to add data to the archaeological register it's usual to sacrifice the original conditions of the site, thus making it impossible to reexamine these conditions later on if new findings suggest updating an original hypothesis. That's why the documentation of the register at the moment of extracting findings is essential to obtain as many data as possible about every artifact, stratum, structure... that provide as much context as possible. When a new finding appears the data collection is more important than the interpretation itself, as it can change in the future, but the information lost in this moment is irrecoverable.

Documentation of a new finding can be literal, graphic, geometric... (description, how it is, where it is, which characteristics it has, in which context it was found...) and it's this complete documentation that will allow to integrate every piece in the general discourse of the site(3), thus exchanging information between sites, creating synergies that enrich the knowledge hypothesis and establishing interactions among them.

Although the documentation process is not totally standardized, there are good practice guides regarding documentation, storage and creating digital repositories for exchange, as the Archeology Data Service, from York University in collaboration with The Digital Archaeological Record (4), under Digital Antiquity Organization, acting also as storage and exchange repositories.

Graphical documentation consists mainly of the realization of drawings, such as planimetries and complete or partial cross-sections of the site in different excavation strata (at 1/500 – 1/50 scales), or details of the findings (1/50 – 1/1), and also with photographs.

Archaeological drawing makes a synthesis, not only a description, of what it represents. The drawing adds knowledge by itself, as the drawer interprets what he sees, highlighting some elements over the others. This enhances interesting features but may omit some details that could be important if a reexamination was needed later on to develop a reinterpretation.

If the drawing is in coordinates and at scale this also allows to measure and determine where each element was located in relation to others, adding geometric documentation.

Photography, however, is objective, it doesn't interpret. This makes possible to recover details that were originally omitted. Though it doesn't allow, by itself, the extraction of measurements and exact location of elements, the recovery of information is limited in this aspect, and it also depends on the point of view where it was taken, which shows or omits certain details.

The development of digital world and its growing scale has contributed with new tools that are slowly being introduced in the archaeology field and that have potential (often still unexplored) to deepen in the conservation, analysis and dissemination of valuable information. Databases, GIS (geographic information systems), digital image and tools for communication and distribution of information mean an important advance in the achievement of knowledge and also complement the traditional tools used to date.

In this work, the massive data captured to build three-dimensional digital models of the real world, created from images or laser measurements, allow the creation of snapshots of the

¹ Versió en català d'aquest capítol a l'ANNEX 1 - .

excavation process, that is, the accurate reproduction of the different phases, which can be recovered and revisited in further analysis as many times as needed, among other applications.

These 3-D digital models add:

- Snapshots of the successive excavation phase
- Massive data capture (interpretation is done later, and can be reproduced as many times as needed)
- The models include metric information: it is possible to measure, extract coordinates and to relate among them (this requires the georeferencing at the moment of the data capture)
- They have texture: the “skin” of the model has an image, that is, it is possible to identify elements and some of their properties
- They are not totally limited to a single scale or point of view

But these tools have some associated requirements and problems, mainly in the practical aspects:

- They need the support of hardware and software for its capture, processing, query and analysis.
- Digital formats (will they be readable in the future? Will the required hardware and software be available then?)
- Storage and maintenance (files use to be considerably large, and they have to be maintained for long periods of time)
- Specialized personnel is required

While archaeological drawing requires interpretation, and archaeologists can't be replaced in the selection of the valuable details to be represented, the creation of 3D models can be (and often is) done by external technicians, as it deals with a massive and indiscriminate data collection (5). In this case a good communication with the archaeological team and a good understanding of their needs is essential to plan the suitable moments, scopes and collection methodologies. Another option involves sharing these tasks. This means that the archaeological team could implement the image collection, at their convenience and with the necessary advice, while geometrical measurements for georeferencing and data processing for 3D models can be done by specialized technicians.

In addition, we have to keep in mind that unfortunately the archaeological activity has to deal with really limited budgets.

That's why an essential part of this work will be to search for methodologies as efficient and affordable as possible in terms of both economy and usability and trying to maximize its reach and implementation possibilities. Digital photogrammetry seems to have better potential because it does not depend on expensive and specialized hardware anymore and to the appearance of low cost or even free software.

3. ARCHAEOLOGY AT GARRAF¹

There is evidence of human occupation at Garraf Massif since prehistoric times. The Massif, straddling Baix Llobregat, Garraf, Alt Penedès and Baix Penedès regions, is limited by Llobregat river and its delta, the prelitoral plain and the Mediterranean coast down to Calafell.

The inner massif offered little cultivable zones and that's why the main concentrations of settlements were at its slopes or base. These lands were later heavily transformed and exploited, and most of the archaeological vestiges disappeared.

The massif is made almost entirely of karst, and it has an underground drainage system, with many sinkholes and some caves. This offered many shelters to settle. These cavities have preserved a valuable witness of the human occupation for a long time. The caves of Can Sadurní at Begues, Gegant at Sitges, Del Rinoceront at Castelldefels, De la Pesseta at Torrelles de Foix, Foradada at Calafell and many others whose studies have just begun, are archaeological sites that, together constitute the knowledge about the cultures of the old inhabitants in this area. There is also evidence that these sites were related among them, with populations that moved and traded, since it was an area with intense interactions. Garraf is an archaeological area of first category because of the abundance of cavities apt to be occupied, but it wasn't until the end of XX (6) century that Paleolithic sites were identified and its systematic study began. The recoveries have a temporary span from 49 000 years BP to our days.

The archaeological study of Garraf began at the end of the XIX (7) century (along with the first interest in archaeology as a discipline), with the Renaixença movement and the first hikers. But in that first period just collectible pieces were valuable, which became property of the discoverer, so it was a period of uncontrolled excavations and pillaging, almost without any documentation. This practice partially ruined lots of sites. In the 30s the first laws that remarked the scientific interest of the objects recovered were enacted, but the field methodology wasn't still consolidated. Although in the 40s and 60s some scientific studies began in the area, it's not until the 70s that the general methodology in the field is enhanced thanks to research, university support and the contribution of other scientific disciplines. It was in 1978 that the first long-term prehistorical research projects began at Garraf with the study of Can Tintorer mines in Gavà and Can Sadurní cave in Begues. They were led by Josefa Vilalba, Manel Edo and Manel Alonso and added contributions of Dr. Joan Maluquer.

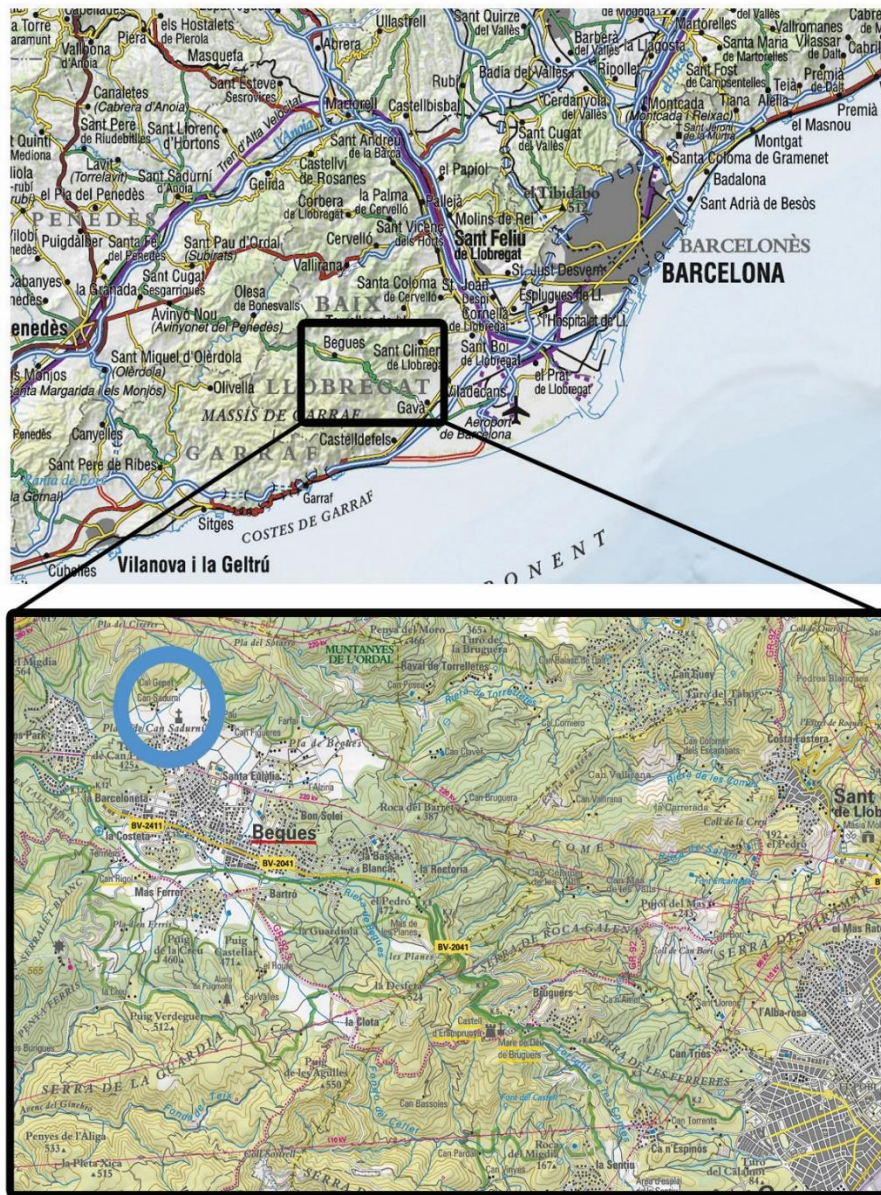
Nowadays there are more than 500 catalogued sites in Garraf and 120 of them are prehistoric (there are about 400 in Catalonia), but some of them were plundered in early periods.

3.1. CAN SADURNÍ CAVE

Can Sadurní cave (8) is situated at Begues, Baix Llobregat, near Can Sadurní country house, from which it takes the name, at 420 m above sea level. The cave belongs to the Begues polje, on its higher side. Begues valley has always been a crossroad, and this cave is the best located, in a strategic communications node, and with fertile land and water nearby.

The archaeological site is formed by the exterior terrace and the cavity, of karstic formation and natural sinkhole of the dell formed by the terrace.

¹ Versió en català d'aquest capítol a l'ANNEX 1 - .



Il·lustració 3-1. Location of Can Sadurní archaeological site in the municipality of Begues (font ICGC).

The exterior terrace has an extension of 325m², is almost circular, and half of it is limited by limestone rocks, where there is the cave opening (N-NE). In the terrace there is the excavation with a set of storage silos.

During a test excavation in 1978 three structures appeared, directly excavated in the sedimentary platform. The silos have circular shape and rounded bases, with diameters around 1 m and 0.75 m deep. Archaeologists estimate that those three excavated silos would allow to store approximately one ton of grain, mainly barley and spelled, and this could demonstrate the presence of a stable cave occupation (9). The grain would be stored directly in the silo and then closed hermetically, with a layer of wet clay around its perimeter to make it possible to germinate the outer layer of grain, consuming the internal oxygen and thus keeping the remaining grain preserved. It is possible that in the area of the terrace not excavated yet some more silos could appear. Those would have allowed the subsistence throughout the year of the community that inhabited the cave. Its size, location and the signs that served to storage grain suggest that the cave was occupied at that time. The first part of this work is focused on the digital modelling of these structures.

The cave, focus of the second part of this work, has an artificial opening since 1851, when it was closed by the army as it was used as a criminal hideaway. There is a big hall, of 190m², elongated with a vertex in the N-NE direction, about 20 m long and 15 m wide, and 5 m high to the initial excavation height. The sediments are disposed in conical shape from the cave opening (as a sinkhole of the outer terrace), conditioning the stratum disposition in the excavation register.



Il·lustració 3-2. Can Sadurní cave: In the first place, the terrace, with the sitges on the right, and the current entrance to the bottom.

Although at an initial moment, the site viability to offer virgin material to be studied was unclear because there were evidence of previous excavations and signs of land movements, initial studies showed that under the moved land there still were lots of unaltered sediments. This led to the beginning of the excavation (10). The cave has been excavated since 1978 (with a pause during years 1983-1992), always led by CIPAG (Col·lectiu per a la Investigació de la Prehistòria i l'Arqueologia del Garraf-Ordal) and directed by Manel Edo, Anna Blasco and Ma Josefa Vilalba, with the collaboration of Universitat de Barcelona and Ajuntament de Begues. At this day, 51 grid squares are being excavated, including a test pit of 4 squares used to identify and codify layers (stratigraphy works classifying sediments in strata) for the rest of the excavation.

The first layers, closer to the surface, correspond to fill works and uncontrolled visits made for the last 50 years. Under layer 3 there are the virgin materials, which span from II century to modern age. Below, there is a back progression in time, almost continuous, to layer 21, dated at 10500 BP.

The cave adds data on prehistory spanning from microlaminar Epipaleolithic to geometric Epipaleolithic, Mesolithic, Old Neolithic (cardial, Epicardial) mid-Neolithic (Postcardial) and final-Calcolithic, to Bronze Age, with singular findings, like various sepulchral episodes, a little ceramic statue, named l'Encantat de Begues (the oldest known in Catalonia, dated at 4500BP) and evidences of beer production and consumption, nowadays the oldest known in Europe, around 4300BP.

Along with excavation, the team has been working on the protection, consolidation and conditioning of the site, with the installation of scaffolding, and access remodelling, installing a perimeter fence and adaptating the access trail and terrace. At this moment, Can Sadurní Horitzó 30 project is being carried out on prehistoric research and cultural dynamism, focusing

on the dissemination of the historic heritage of the Massif and the creation of an Archaeological Park that will serve as a Centre for Prehistoric Interpretation of the cave of Can Sadurní. At this day, the cave can be visited in guided tours every month's first Sunday and third Saturday.



Il·lustració 3-3. Can Sadurní cave: guided tour to the inner part of the archaeological site.

4. MASSIVE DATA CAPTURE SYSTEMS¹

“Excavation is destruction” or, at least and “unrepeatable experiment” are some of the most used expression by archaeologists highlighting the importance of documentation. Excavation process can also be referred as a creation process of data and information (11). These sorts of considerations have made SCM more and more popular in the last years, along with more accessible and affordable.

SCM to obtain three-dimensional models can be done with passive (image based) or active (laser scanner) technologies.

First method (passive) is based in the extraction of three-dimensional information from two-dimensional images. 3D position reconstruction for every pixel is done with the application of a set of computations that includes the camera calibration parameters along with the identification of corresponding pixel pairs in different images to compute camera positions for every picture and finally 3D coordinates for every pixel in the image.

The second method for massive data capture is the measurement of distances and angles to the surface, obtaining relative position (coordinates) of points in the space (point cloud) from a laser scanner. The massive capture has enough density to generate a three-dimensional surface. In both cases, later a texture is added with the projection of images to the surface.

These two main groups of methodologies (image and laser measurements) can be divided into subgroups, each one with different characteristics and conditions that end up considered complementary. But at a first level, the two main groups have a series of common points:

- Active methods require more inversion, as they need specialized equipment, specialized software and also specialized personnel in every step, from field work to the elaboration of final products.
- Passive methods use more affordable equipment requiring less inversion, but also need specialized software and personnel in every step.

Finally, both methods need topographic support to georeference the 3D methods.

This work, searching methodologies as affordable as possible that can be generally introduced in the workflow of any archaeological project, no matters its magnitude, will focus in different image-based methods, although a small overview of active methods will be made for its consideration in specific situations.

4.1. IMAGE-BASED METHODS

Image-based methods can extract three-dimensional metric information from overlapping bi-dimensional images. Yet from XIX century, little after the invention of photography this possibility was identified, and its development began. Tools and methodologies evolved, but always depending in expensive and very specialized metric cameras and complex mechanic equipment for information extraction. First computers from 60s allowed a jump from analog to analytic photogrammetry, releasing the technic from the mechanical hardware to extract the 3D data form image pairs, automating the needed

¹ Versió en català d'aquest capítol a l'ANNEX 1 - .

computation. Finally, digital photography allowed to migrate the whole process to computers, and its growing processing capacity allowed also to highly automate image processing, camera calibration (so metric cameras were not indispensable) and data extraction, simplifying every step, and making this technique more accessible to more areas and applications. The contribution of computer vision to stereoscopic vision is remarkable. And the creation of digital formats of 3D graphic representation allowed the appearance of new products that trustworthy reproduce the represented object with high detail and without compromise, so it is possible to store all the information without the limitations of a single point of view or scale.

Right now, this method uses digital graphic information contained in digital files (digital images) to obtain metric three-dimensional information. So, the basic information to build a 3D model is a set of digital images, taken from different points of view and overlapped of the element to reproduce and the coordinates of a set of well identified points visible in the images to georeferenced the model.

The 3D position of every minimal graphic unit (pixel) will be calculated from a set of 2D images (that will have some requirements depending on the processing method). Three-dimensional information is obtained from the relative displacement of the same pixel images, because of the difference in the point of view of every image, along with the computed projection parameters and lens distortion. A point cloud will be constructed with the set of 3D coordinates for every pixel, where every point have relative position to the rest and its colour information. From this cloud, in the same software package or in a complementary one, it is possible to build a triangular mesh, where a texture (from the original images) can be projected. Finally, the last step is to correlate the model coordinates with the site coordinate system through the identification and coordinate assignment of the reference points that have been previously measured on field. This led us to obtain the accurate reproduction of any excavation state in its original position and it's going to be possible to overlap and compare them, and also to recover or element positions or measurements that may be omitted at the moment of excavation.

There are two main methodologies to obtain three-dimensional models from images: Close Range Photogrammetry (CRP), that shares methods with classical photogrammetry applied to short range scenes and Structure From Motion (SFM) a method that comes from artificial vision and takes benefit of the higher processing capacities of computers to make taking and processing images easier and more flexible. Despite this classification, programs use to mix tools from both.

4.1.1. Close Range Photogrammetry (CRP)

CRP uses the same general methodologies of photogrammetry, which since the late XIX allows 3D reconstruction from 2D images through precise knowledge of the camera's projection parameters, applied to nearby scenes. It is based on obtaining overlapping images from different points of view, the reconstruction of the trajectories of the beams of light from the object to the camera, and the calculation of the intersection of these bundles to obtain 3D information, that is, the three-dimensional reproduction of the photographic object (13).

Photogrammetry initially requires a calibration of the lens-camera set, or internal orientation, to be able to reconstruct the trajectory of each beam of light from the object to the sensitive support of the camera. Taking into account the geometric properties of the lens and its distortions is then possible to reproduce it in reverse to determine the starting position of each visible element in the image.

In CRP images must be taken in longitudinal displacement passes, with a generous longitudinal overlapping between them (approximately 70% minimum) and also some transversal overlapping between passes. The scene to be represented appears in more than one image, and images are parallel to each other for each pass.

Once it is possible to reconstruct the linear trajectory of the light beams, it is necessary to know which the relative position of the cameras was image were captured (external orientation). To do this it is necessary to identify some selected common points in two or more images, create the trajectories of the beams and then compute the projection points of the cameras where the intersections of them coincide. Once the projection centres of each image are located, identifying the rest of common points in the overlapping images and reconstructing their light beam will make possible to reconstruct the direction of each one and to determine their intersection thus obtaining the original 3D position for every pixel. With this set of positions, the point cloud is created, which will be the basis for the creation of the 3D mesh, on which, in addition, the original images can be projected to texturize it.

The result is a dense point cloud from which a triangular mesh, with photographic texture from original images, is created and referenced to the site coordinate system. This referenced textured mesh accurately reproduce and document the site state at the time of taking pictures and it is possible to extract coordinates and perform measurements on it, and it can also be observed from any point of view. The main characteristic of the solutions based on classical photogrammetry is that they require the use of a single combination of lens-camera in a constant focal distance, and the calibration of it to determine its geometric and distortion parameters with high precision (internal orientation).

4.1.2. Structure from Motion (SFM)

As mentioned, the increasing capacity of computer processing, as well as the generalization of digital cameras and the contribution of the field of artificial vision, have made possible the development of algorithms that aim to obtain the relative positions of camera centres as well as the coordinates for every pixel, with the single requirement of having multiple overlapping images of the same object, without knowing the initial position or characteristics of the camera (or even different cameras). From them, with the only condition that images have to be taken from different points of view (that is, moving the camera around the object), it is intended to obtain the calibration and situation of the camera, expressed by a projection matrix. While it is not essential, it is recommended to maintain the same combination of camera - lens and make the photos as orderly as possible to simplify computation. The methodological theory of the SFM allows the calculation of these elements of projection and distortion of the camera, its position and direction, and 3D point coordinates (the 3D model structure) in a single calculation, refined using an iterative adjustment of high redundancy of light beams (bundle adjustment) from common points automatically detected in overlapping images (14).

The result is the parameters of each image (internal and external orientation) and a set of selected 3D points visible on the images.

The steps to obtain the result are (15):

- Feature detection on every image
- Feature matching for image pairs and identification of common points.
- Obtention of 2D coordinates of common points.
- 3D solution of the SFM model from 2D beams.
- Model refinement using a bundle Adjustment.

The first step is the identification of these common points. The development of feature matching algorithms or attribute correspondence has automated this step identifying, first, similar areas in images and then selecting unique points of these, for example characterized by strong contrast elements (assuming that the environment of the same pixel in two slightly different images will be similar), such as the SIFT algorithm (2) among others.

To compute all the parameters that will allow the reconstruction of pixel positions in space, once common points are detected in different images, it has to be considered that the projections of any point in two images are in the same plane along with the camera centres (epipolar plane). This feature is used to restrict the possible location determination of the cameras and to obtain their relative position and internal characteristics at the same time.

To extend the computation to every camera pair there are two approximations. Select an initial pair and then add images to the computation (sequential method) or compute all images at the same time (factorization method).

First method has the advantage of consuming fewer computing resources, but it has some limitations. For example it requires each point to be visible in a minimum of three images, which may difficult the representation of long linear sequences (such as a wall or street facade), and there are singular situations in which the algorithms can fail (photos taken from the same point, without camera translation, planar scenes, noise in the correspondence measures of points ...) which can degenerate the results of the computations. A careful planning of image capture is needed to avoid these possible problems.

On the second method the set of images is calculated at the same time, so that there is a distribution of the possible errors or degenerations of calculation, not producing, in general, gross errors. But, nevertheless, a good planning is also needed in image capture, since in this approach it is necessary that some points can be seen on all the images.

After that, cloud densification is carried out, with the execution of MVS algorithms (Multi-View Stereo). These algorithms are intended for three-dimensional image-based reconstruction (once the positions of the cameras are known), but, unlike classical photogrammetry, that use parallel or convergent images with similar object-camera distances and separations MVS aims to reconstruct it often from a large number of images, and these can be in very different positions and directions, and even come from different cameras and with different illumination conditions. Once the positions of the cameras are known, however, to determine the 3D position of a point it is only needed to compute the intersection of its beams. The problem that the MVS algorithm aim to solve is the unequivocal identification of a pixel of an image in its epipolar line of another image, using filtering strategies to avoid confusion with the noise of the image, variations of illumination or colour, or even for the presence of occlusions that do not actually have a corresponding pixel (photoconsistency measures).

It must be considered that these algorithms have difficulties in specular, low-illuminates or non-textured surfaces, thin objects or repetitive patterns.

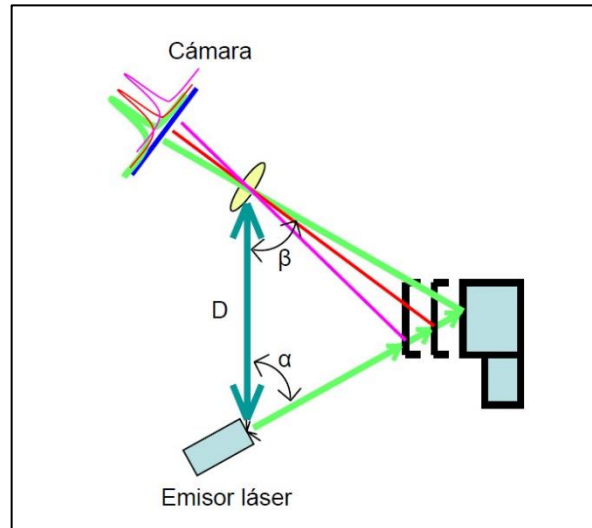
4.2. METHODS BASED ON LASER MEASUREMENTS

Another option to get a 3D model is performing direct measurements using a laser scanner. These (active) measurements are based on the emission of a controlled radiation and its detection by a receiver to obtain the distances. This distance, along with the direction of the radiation beam emitted, allows the positioning in the space of each measured point (16).

There are, among the methods of active measurement, different approaches, which end up responding to different requirements. They can be divided in two main groups:

4.2.1. Triangulation

The transmitter and receiver (camera) are separated a known distance (base), and transmitter's angle relative to this base is also known. Depending on the reception angle to the camera, a triangle can be solved, and thus the position of the measured point. Some devices project patterns of light to get more accurate determination of the surface to be represented. This sort of devices allows very high precision, up to microns, but they act at short distance (about 10 m maximum).



Il·lustració 4-1. Working schema of a triangulation laser scanner, from (16).

4.2.2. Time-of-flight

There are two main subgroups:

- **Pulses:** The emitter sends a signal and tracks the return time. Knowing the speed of light in the air, it is possible to know the distance of the point at which the beam of light has bounced. To determine the direction, the device has of a beam diverter (reflector, prism ...) that sweeps the beam, and registers the direction to each emission of the pulse. This type of device reaches a long range, up to several hundred meters, but at lower precision (6-10 mm) and resolution.
- **Phase-based:** They act similarly to pulses but measuring the phase difference between the emitted and bounced signal instead of time. Using different wavelengths allows to refine the measurement and increase the reach beyond the minimum wavelength for the required precision. These have accuracies of up to 1-2 mm (at 10 m), densities of up to a few millimetres at 10 m, and they can reach up to 70 to about 300 m depending on the model (obviously the resolution and precision of the point cloud will vary considerably with the distance, but in general they have better than precisions than pulse systems, at the cost of a lower reach).

Lately, technologies that combine both methods have been developed to improve the reach and accuracy of the measurements (pulse time-of-flight and wave analysis) , along with hybrid total station / scanner instruments, which combine the possibility of scan small areas besides its use as a regular surveying device.



Il·lustració 4-2. Examples of terrestrial laser scanner (ELT)

Most laser scanner devices incorporate image sensors, allowing the creation of texture to be superimposed on the three-dimensional model, as well as the software necessary for the processing and formation of the 3D models. They often require topography support for the determination of coordinate signals (spheres, targets ...) to georeference the models in the site coordinate system.

The main drawback of the laser scanner methodologies to systematically work in archaeological sites are, as mentioned, the investment they require (whether in purchase or rental) due to the dependence on the use of specialized equipment and the need of trained personnel at all steps, from data capture to processing and realization of final product. For this reason, they will not be the focus of this work. On the other hand, in certain cases they can obtain better accuracies, and they do not depend so much on the illumination of the scene to represent. It must be considered, however, that wet or reflective surfaces can give measurement problems.

4.3. IMAGE-BASED DATA PROCESSING METHODS

Workflow will be different depending on the method used. For the present work, representative tools of each workflow have been chosen to obtain an overall idea of the different possibilities, but in general, for both image-based methods (CRP and SFM), the steps will be similar, with minor variations according to the software used.

The image processing software has been chosen trying to include a significant sample of the current availability, with its different characteristics, limitations and, also, purchase cost. On one hand there is proprietary software, created by commercial companies, with closed code, a professional approach and in general with a better finish, more advanced features and a simpler workflow, but also often with high prices.

On the other hand, there is free software, made in academic institutions or in its environment, that use open tools freely available to developers to be used. Often, they do not cover all the steps to obtain the textured mesh of a 3D model, and the need of complementary tools is necessary. They don't usually have much technical support, and there is a risk of development interruptions, but its cost is very low or free, some allow personalization (open source), or have user communities that generate documentation or support in forums.

Below is a summary table of the software used and its features:

Software	Author	Code	Point cloud	Mesh + texture	Georef.	Cost
Image Master	Topcon	Propietari	No	Si	Si	~3000€
Photoscan Pro	Agisoft	Propietari	Si	Si	Si	3000€
Photoscan Std	Agisoft	Propietari	Si	Si	No	150€
VisualSFM	Changchang Wu	Obert	Si	No	No	Gratuït
Regard3D	Roman Hiestand	Obert	Si	Si	No	Gratuït
Arc3D	ESAT (KUL)	Propietari	Si	Si	No	Gratuït

Taula 4-1. Photogrammetric Software, characteristics.

4.3.1. CRP

As described in the explanatory section (4.1.1), the workflow for CRP programs can be summarized in the steps:

1. Internal orientation: calibration of the geometric properties of the lens-camera set for a focal distance, as well as its distortions.
2. Implementation of reference points (must be visible on images) and determination of their coordinates in the site's reference system
3. Image capture, in overlapping linear passes that include the entire element to be represented, with the same conditions of camera calibration
4. External orientation: Identification of common points in pairs of images and computation of camera positions at the moment of capture. Using the reference points as tie points, the rest of the process will already be geo-referenced.
5. Identification and creation of break lines, where applicable, prior to modelling.
6. Creation of a 3D triangular mesh.
7. Mesh texture with the projection of the original images.
8. Export of the model, in the format suitable for its use or file.

The software closer to the CRP workflow than has been used is Image Master, from Topcon.

4.3.2. SFM

The workflow for SFM methods can be summarized in the next steps:

1. Implementation of reference points (must be visible on images) and determination of their coordinates in the site's reference system.
2. Image capture, from different points of view and overlapped (each point must appear at least in three images), preferably maintaining the lens-camera combination.
3. Matching features algorithm.

4. Camera reconstruction and sparse point cloud
5. Bundle adjustment
6. Point cloud densification
7. Obtention of the triangular mesh
8. Texture addition to mesh
9. Georeferencing
10. Model export to suitable file format

The camera calibration may be optional in some software and can simplify the computation (step 4), and presumably obtain some better results in complex scenes. Some programs join steps 3 and 4 in one, and some software allow the use of masks on images to hide external or uninteresting elements of the scene. This step should be done before step 3.

Recently many photogrammetric SFM software have appeared, from the commercial and academic or research areas. The publication in open code of the main algorithms allowed some authors to develop new software, so most of the programs tested is based on SFM.

The tested programs are:

- **Photoscan** (Pro and Standard version), from Agisoft
- **VisualSFM** by Changahgn Wu
- **Regard3D** by Roman Hiestand
- **Arc3D** by the research group Processing Speech and Images (PSI) of Department of Electrical Engineering (ESAT) at Katholieke Universiteit Leuven.

Some of this software doesn't reach all the steps of the workflow. All of them can create the point cloud, but some need complementary tools to finish the whole process. To complete the work (mesh creation, texture application and georeferencing) two more programs have been used:

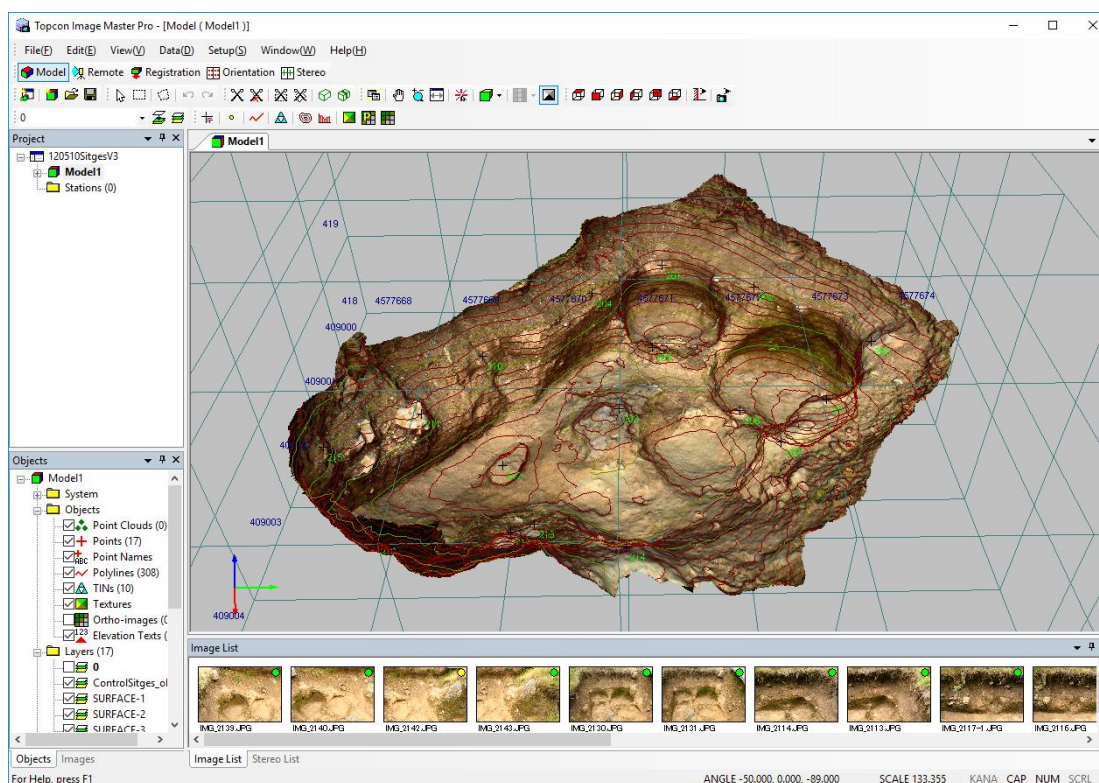
- **CloudCompare**
- **Meshlab**

4.3.3. Eines utilitzades

Relació de programes i dispositius avaluats en el present treball:

4.3.3.1. Image Master

<https://www.topconpositioning.com/es/software-solutions/mass-data-mapping/imagemaster>



Il·lustració 4-3. Image Master, de la casa Topcon.

Image Master és un programa de la casa de topografia Topcon, i és de codi propietari. És tracta d'un programa mixt de fotogrametria digital i gestió de mesures de l'estació híbrida de la mateixa casa.

En l'aspecte fotogramètric, permet calibrar qualsevol càmera digital mitjançant un paquet associat, amb la impressió de patrons per a la presa de fotografies i el processat d'aquestes per a l'obtenció dels paràmetres interns de la càmera, els quals són utilitzats després en el procés de generació dels models 3D. Aquesta calibratge és un pas necessari en la utilització d'aquest programa (tot i que es pot realitzar en qualsevol moment, també després de prendre les imatges per al modelat, reproduint les condicions d'objectiu, focal i preferiblement obertura).

El flux de treball (cal dir que gens intuïtiu) es realitza en diferents entorns (modes *Model*, *Registration*, *Orientation* i *Stereo*) representats pels corresponents botons i que modifiquen els menús i opcions disponibles.

El procés s'inicia amb la càrrega dels punts de suport, la calibratge de la càmera i les imatges preses.

Posteriorment cal seleccionar parells d'imatges, i sobre cada una identificar-hi i registrar punts comuns incloent els punts de suport (amb assistència automàtica, però cal supervisió).

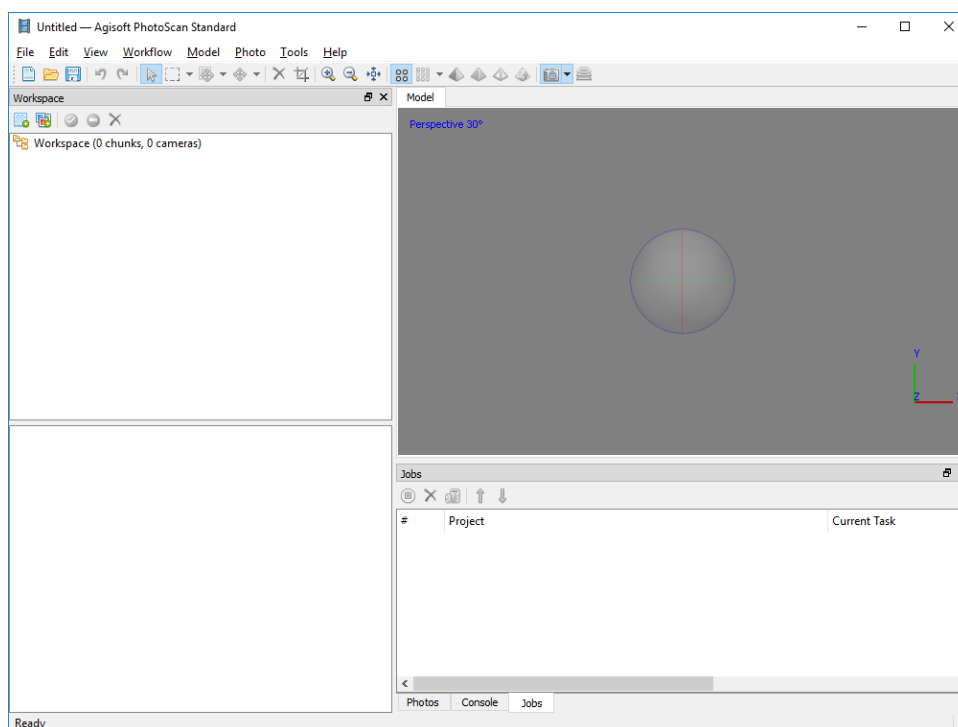
Un cop feta la correlació i orientació de les imatges, i previ a la generació del mallat 3D, el programa permet també el dibuix, sobre les imatges 2D, de línies de trencament per a millorar-ne la definició, en cas de presència d'arestes clares en l'element a modelar.

Posteriorment, es realitza el modelat de la malla 3D per a cada parell de fotografies, i l'assignació de la textura de la imatge corresponent.

També permet la importació i registre de núvols de punts provinents de l'estació total IS de Topcon, i la posterior creació de malles triangulars i creació de textura amb les imatges que pren la pròpia estació.

4.3.3.2. Photoscan Pro i Photoscan Standard

<http://www.agisoft.com/>



Il·lustració 4-4. Photoscan (versió Standard): pantalla d'inici.

Photoscan és un programa de l'empresa russa Agisoft, amb seu a Sant Petersburg, i es tracta també de codi propietari. Es distribueix en dues opcions, amb preus força diferents: la versió Pro i la Standard (una versió retallada de la Pro).

És un software dedicat exclusivament a l'obtenció de models tridimensionals a partir d'imatges, i es basa en els algorismes SFM. No requereix, per tant en principi, d'una calibratge prèvia de la càmera, tot i que el programa permet fer-la per agilitzar posteriorment certes parts del càlcul. De totes maneres cal respectar en la presa de fotografies la utilització d'una mateixa combinació càmera-objectiu i d'una mateixa distància focal. En el present treball, i en la recerca d'una metodologia el més senzilla i flexible possible, no s'ha utilitzat la calibratge prèvia en la realització dels models.

El programa té un flux de treball molt clar (amb una pestanya en el menú amb els passos necessaris ordenats) i possibilitat d'encadenar processos (*batch*) i és, de fet força popular en l'àmbit arqueològic. Les dues versions tenen el mateix ordre de treball, en el qual la versió *Pro* permet la possibilitat d'afegir-hi més passos, ja que la *Standard* és només una versió retallada respecte de la versió *Pro*. A la web s'hi pot trobar un llistat de diferències.

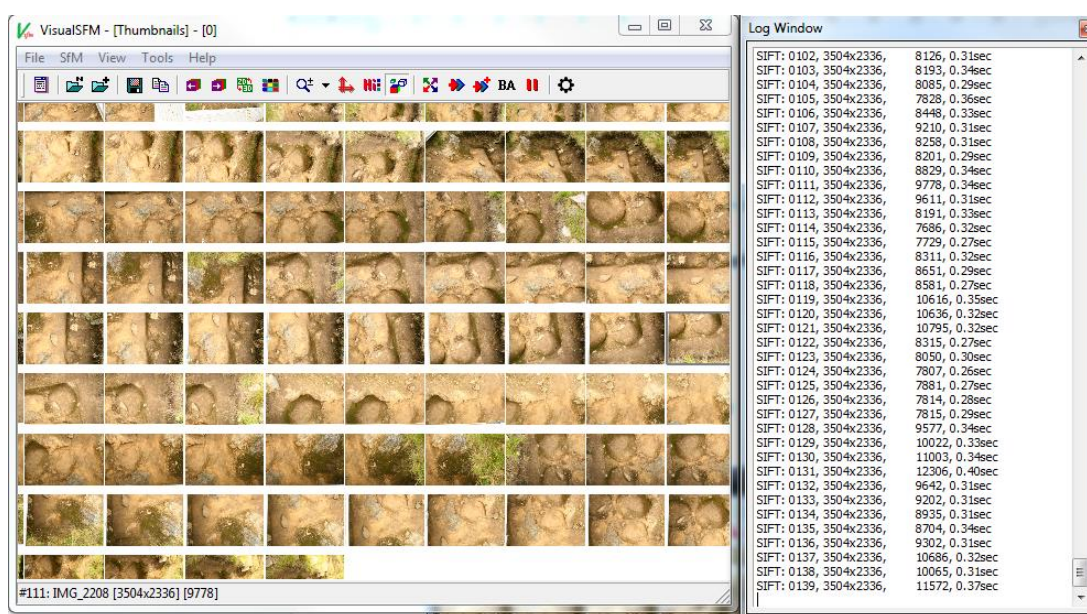
El treball s'inicia amb la càrrega de les imatges (genera avisos si no s'han realitzat amb la mateixa càmera o focal) i continua amb l'alineació d'aquestes. Prèviament es pot definir en cada imatge una màscara de les zones que no es volen utilitzar en el modelat (objectes que provoquen oclusions o sense interès).

Els paràmetres per a tots els passos en general permeten modificar certs paràmetres, amb valors en general expressats en *Low*, *High*, simplificant la seva utilització, prioritzant la facilitat d'ús.

És capaç de realitzar tots els passos, de la càrrega d'imatges fins a la malla de triangles 3D texturitzada, tot i que la georeferenciació només la fa la versió Pro.

4.3.3.3. Visual SFM

<http://ccwu.me/vsfm/>



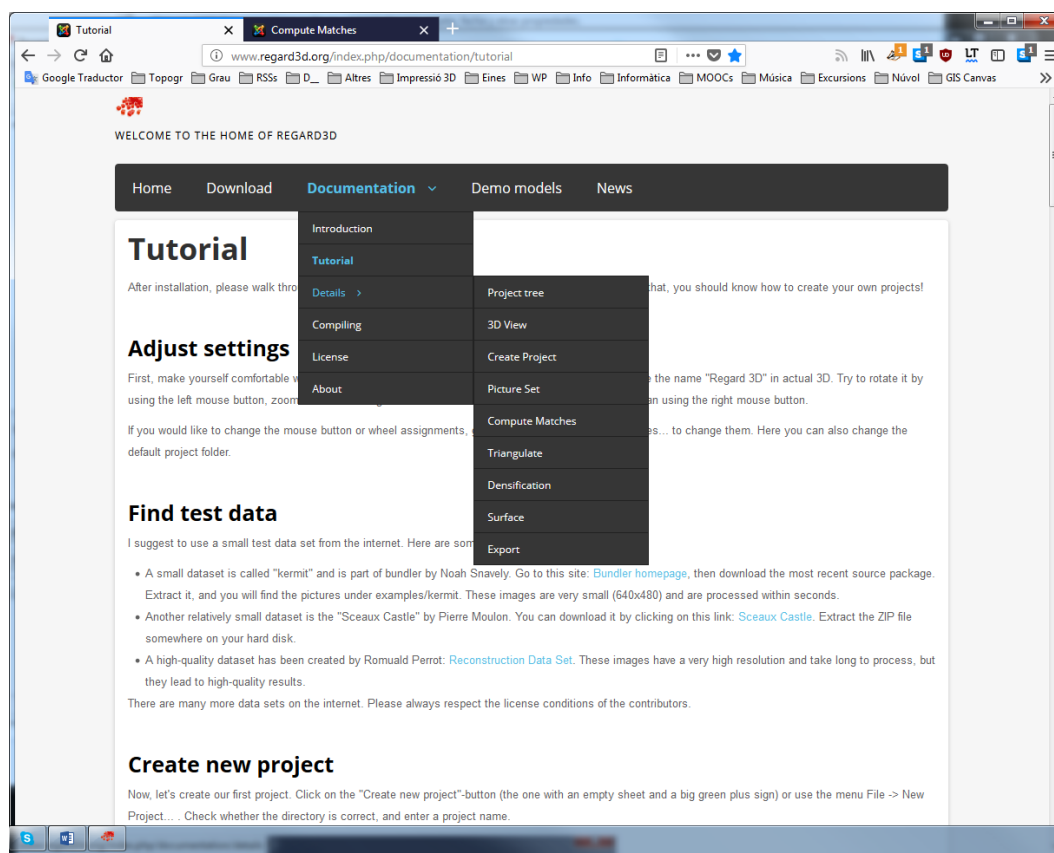
Il·lustració 4-5. VisualSFM, amb imatges carregades i executant l'algorisme de detecció de punts comuns SIFT

VisualSFM és un software creat per Changchang Wu, i disponible lliurement, però parcialment propietari (tot i que part dels seus algorismes principals estan publicats en obert). Es tracta d'una aplicació dels algorismes SFM, utilitzant bàsicament els algorismes SiftGPU (del propi autor) per a la detecció de característiques comuns a les imatges, Multicore Bundle Adjustment, també del propi autor i PMVS/CMVS de Yasutaka Furukawa per a la creació del núvol de punts.

Tal com es descriu en la pròpia pàgina web, la utilització és en general senzilla, en quatre passos (càrrega d'imatges, detecció d'elements comuns, alineació i creació del núvol de punts). Aquest software no produeix, però, la malla 3D ni la textura corresponent, així com tampoc la georeferenciació del model, havent de finalitzar el procés en un altre software, tot i que permet exportar el resultat en un format que facilita la tasca a Meshlab. A la seva web s'hi pot trobar força documentació, encara que bastant tècnica, i alguns tutorials en vídeos o text.

4.3.3.4. Regard3D

<http://www.regard3d.org/>



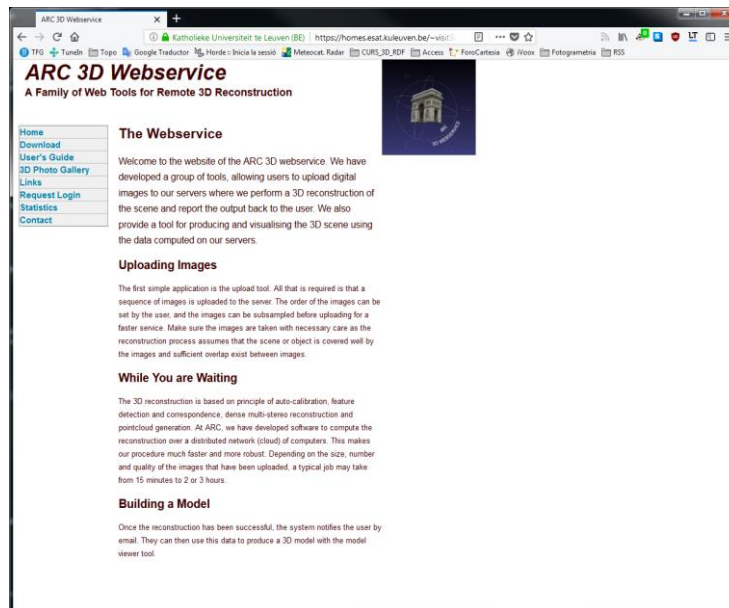
Il·lustració 4-6. Regar3D: pàgina web amb la documentació per a cada pas.

Regard3D és un programari SFM obert, de descàrrega i ús lliure, i sense cap restricció d'ús no-comercial o comercial, i realitza tot el procés des de la càrrega d'imatges fins a l'obtenció d'un núvol de punts i malla colorejada 3D, excepte el procés de georeferenciació. És obra de Roman Hiestand, enginyer de software suís. El programa integra altres programes i algorismes, com A-KAZE de Pablo F. Alcantarilla, Jesús Nuevo i Adrien Bartoli per a detecció de punts comuns, CMVS/PMVS by Yasutaka Furukawa, MVE (Multi-View Environment) de Michael Goesele, Simon Fuhrmann o SMVS (Shading-aware Multi-View Stereo) de F. Langguth per a densificació dels núvols de punts, Poisson Surface Reconstruction, de Misha Kazhdan i Floating Scale Surface Reconstruction (FSSR) de Simon Fuhrmann i Michael Goesele per a la creació de la malla triangular.

Està sorprenentment ben documentat per tractar-se de programari no comercial, i conté un tutorial que guia tots els passos amb explicacions dels seus diferents paràmetres (tot i que a vegades copiats dels autors originals).

4.3.3.5. Arc3D

<http://www.arc3d.be/>



Il·lustració 4-7. Arc3D, pàgina web d'accés al servei i guia d'ús.

Programari creat pel grup PSI (*Processing Speech & Images*), dins el *Departement of Elektrotechniek* (ESAT) de la *Katholieke Universiteit Leuven*, a Lovaina (Bèlgica).

Es tracta d'un servei web que realitza tota la computació de la calibratge de càmeres i realització del model 3D al núvol. Requereix de la descàrrega d'un petit programa a l'ordinador per a la càrrega de les imatges, i de la creació d'un compte d'accés (gratuït, sense més requisits que una adreça de correu electrònic i contrasenya).

El funcionament és totalment automàtic i opac, no hi ha la possibilitat d'editar cap paràmetre en tot el procés, com tampoc d'especificar màscares per a zones de les imatges que continguin elements externs a l'escena. Només permet reduir la mida de les imatges a l'hora de realitzar la càrrega d'aquestes al servei. Una descripció del seu funcionament intern, amb detall de tots els passos que segueix es troba a (12).

La malla resultant està limitada a només 10000 cares i amb una mida d'aproximadament 1MB, per la qual cosa ofereix molt poc detall per a un ús posterior d'anàlisi. De tota manera pot ser interessant per crear models per a divulgació, al ser un procés simple d'usar i obtenir resultats que ocupen poca memòria i són àgils per visualitzar, per exemple, en línia.

4.3.4. Mètodes basats en mesures làser

Per a la realització del treball s'ha pogut disposar també d'una estació híbrida Topcon IS-203 que permet automatitzar la presa d'un escombrat de punts, així com la captura d'imatge. Amb aquest aparell s'ha realitzat la modelització general de l'interior de la cova, amb diferents escombrades que s'han fusionat en un sol model.

4.3.4.1. Estació Híbrida Topcon IS-203

És una estació total robotitzada amb la possibilitat de realitzar escombrades de mesuraments làser sobre una àrea definida. L'aparell funciona com una estació total habitual, en la qual es pot programar la presa de dades en forma d'escombrades. Té dos avantatges clars. Per una banda la doble utilització en les tasques d'excavació en un sol aparell (topografia i escaneig) i per altra banda, en el cas de l'escaneig és que la presa de dades està directament georeferenciada si es treballa des d'un punt de referència amb l'aparell orientat, de manera que el model que se n'obté té nativament la situació i escala reals. Per altra banda, la velocitat de mesura no és en absolut comparable a la dels aparells escàner làser, ni tampoc la densitat de punts que es pot pretendre prendre en un model de les característiques de l'interior de la cova, però pot ser una eina vàlida si, com en aquest cas, se'n té disponibilitat.

La IS-203 és un model ja una mica antic, i en el mercat hi ha actualment solucions més avançades en la intersecció entre estació total i escàner làser. En aquest cas es tracta d'un aparell de 10^{cc} de precisió angular i $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ en distàncies.

Les escombrades es realitzen a una velocitat de 20 punts per segon, molt lluny dels gairebé un milió que poden arribar a assolir els aparells de làser escàner especialitzats, la qual



Il·lustració 4-8. Estació híbrida Topcon IS-203 en procés d'escanejat.

cosa allarga molt el procés. La presa d'imatges es realitza amb una càmera integrada de 1,3Mpx, ja calibrada, però que ofereix resultats decebedors, sobretot amb la il·luminació artificial de l'interior de la cavitat.

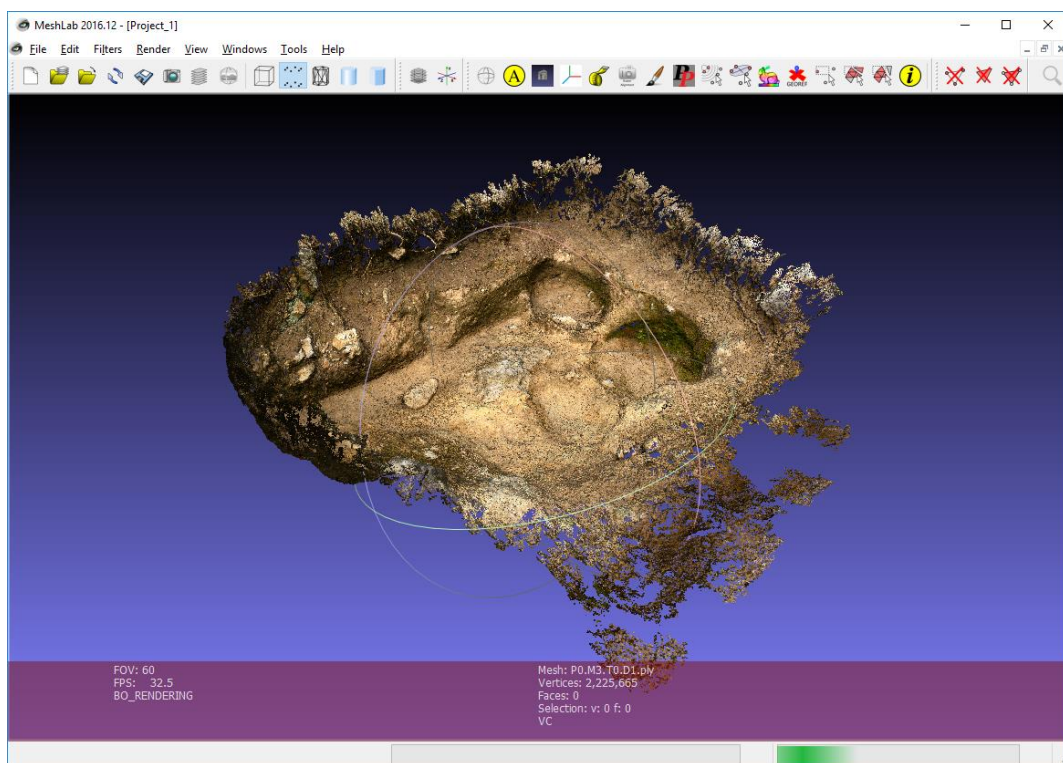
El tractament del núvol de punts (descàrrega, unió, mallat, texturització) s'ha realitzat amb el programa Image Master (veure 4.3.3.1).

4.3.5. Eines complementàries de processat de núvols de punts i malles.

Tant per a finalitzar el resultat del model 3D (núvol de punts + malla de triangles amb textura) per a diversos programes que es limitaven a l'obtenció del núvol de punts com per a la realització de comparacions i anàlisi s'ha hagut de recórrer a un parell d'eines complementàries. Seguint amb la idea de cercar eines el més assequibles possibles s'ha triat dos programes lliures, però amb interessants possibilitats.

4.3.5.1. Meshlab

<http://www.meshlab.net>



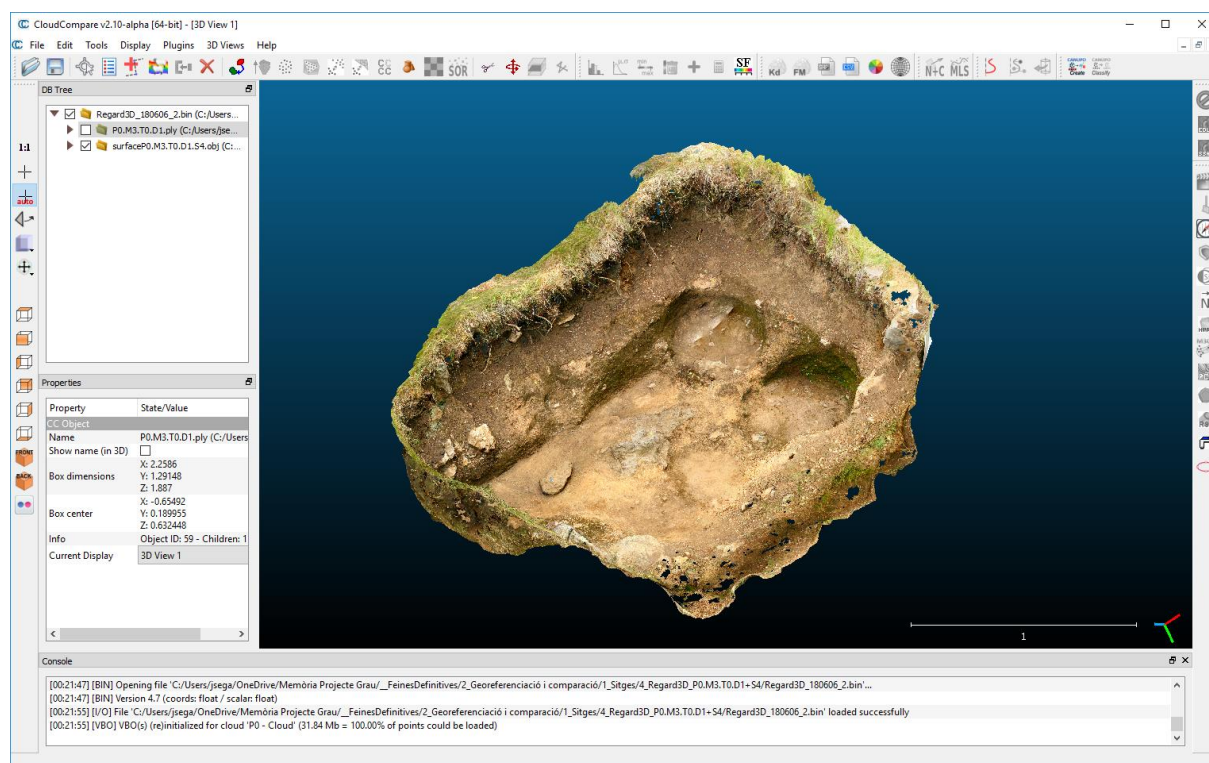
Il·lustració 4-9. Meshlab

Meshlab és un programa especialitzat en processat i edició de malles triangulars, com la creació, inspecció, neteja, conversió, renderitzat o texturització d'aquestes entre d'altres, amb gestió des del núvol de punts fins inclús la preparació de models per impressió 3D. El seu desenvolupament està dirigit per Paolo Cignoni i Guido Ranzuglia, del Visual Computing Lab de l'Institut di Scienza e Tecnologie dell'Informazione A. Faedo (ISTI), un institut del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), d'Itàlia.

En el nostre cas s'ha utilitzat per la creació de la malla de triangles, i per a donar color a aquesta amb la texturització mitjançant les imatges originals (13).

4.3.5.2. Cloud Compare

<https://www.cloudcompare.org/>



Il·lustració 4-10. Cloud Compare

Cloud Compare és un programa de gestió de núvols de punts i malles, inicialment desenvolupat per Daniel Girardeau-Montaut, en una col·laboració entre Telecom ParisTech (*École nationale supérieure des Télécommunications*) i el departament d'I+D de EFD (*Électricité de France*), per a la comparació i detecció de diferències entre núvols de punts, i que posteriorment ha anat evolucionant com a projecte independent i programa de codi obert, amb nombroses col·laboracions, i que amb el temps ha anat afegint funcions més generals en la gestió i processat de dades 3D. El seu ús és lliure per a projectes no-comercials o comercials, i en principi és gratuït, tot i que per al seu manteniment depèn de les donacions i aportacions dels seus usuaris.

Permet la manipulació de núvols de punts o malles, i conté un gran nombre de funcions, com la segmentació o unió, el registre o transformació, el filtratge de dades i diferents modes de visualització i exportació entre molts d'altres, algunes de les quals poden servir també per al seu anàlisi (anàlisis de color, visualització d'alçades...).

Principalment, en el cas que ens ocupa s'ha utilitzat per a la georeferenciació del model, amb l'eina d'alineació per parell de punts i per a la realització de comparacions.

5. TREBALLS REALITZATS

Com s'ha comentat el jaciment està dividit en dues zones principals, la cova pròpiament dita, i la terrassa a la zona de la boca d'entrada.

La primera part del treball s'ha realitzat a la terrassa, i ha consistit en la modelització d'una cala ja excavada que conté les restes de tres sitges d'emmagatzematge de gra. Aquesta primera part s'ha realitzat exclusivament amb SCM basats en imatge.

La segona part s'ha realitzat a l'interior de la cova i ha consistit en la realització d'un model general, per provar les possibilitats d'una estació híbrida amb funcions d'escaneig, comparada amb un escanejat del qual es va poder disposar del núvol de punts final, i un modelat a partir d'imatge.

Després de crear els diferents models tridimensionals a partir d'unes mateixes dades d'entrada, l'objectiu és comprovar la consistència dels resultats, és a dir si els models de sortida són equivalents entre ells, i veure si les diferents eines avaluades són aplicables. Aquesta comprovació s'ha realitzat per comparació entre models, obtenint valors de separacions entre ells.

5.1. ZONA DE SITGES

L'excavació de les sitges correspon a una cala realitzada per avaluar les possibilitats del jaciment en aquesta zona, i ocupa una àrea d'uns 4 m x 2 m. El procés d'excavació ja estava acabat, es tracta, doncs, de la documentació d'estat final d'excavació per a aquests elements. En aquesta zona s'ha treballat només amb mètodes basats en imatge.

Com a pas previ es va realitzar una neteja (duia temps excavada i està a la intempèrie), retirant material estrany i eliminant vegetació, sobretot a la zona perimetral per evitar obstruccions. Per a la presa de les imatges es va aprofitar una passarel·la de bastida que feia de protecció i que es va anar desplaçant per tal de fer passades a prop de la vertical, completades amb passades obliqües.



Il·lustració 5-1. Sitges, estat previ a l'acondicionament i presa de fotografies

Es tracta d'una escena situada a l'exterior, i les imatges es van realitzar sense la incidència de llum directa del sol, i per tant amb il·luminació difusa, força ben repartida i evitant la presència d'ombres d'alt contrast, la qual cosa representa unes condicions molt favorables per al posterior processat i representació. Per aconseguir-ho, però, es va haver d'esperar a última hora de la tarda, i la llum començava a escassejar, per la qual cosa es va haver de tenir cura d'evitar fotografies mogudes, bo i intentant mantenir una sensibilitat ISO baixa per evitar la presència de soroll i l'obertura relativament tancada per assegurar que la profunditat de camp incloïa tota la imatge dins de focus.

5.1.1. Captura d'imatges

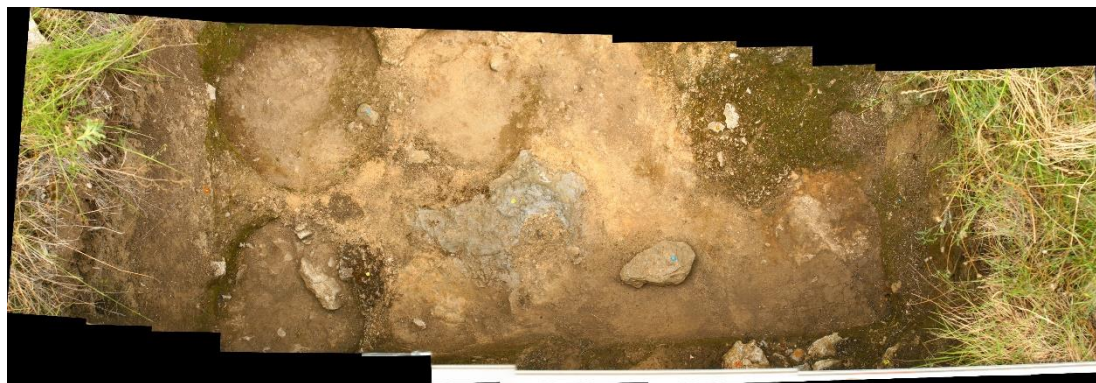
5.1.1.1. Càmera

Per a la realització de presa de les imatges es va disposar d'una càmera rèflex digital convencional Canon EOS 30D (14), amb sensor APS-C (22.5x15 mm) de 8Mpx (3504 x 2336), el qual representa una mida de píxel de 6.4µm, amb un objectiu fix Canon EF 24 mm i obertura màxima f/2.8 (15).

5.1.1.2. Presa d'imatges

La presa d'imatges es va realitzar en passades paral·leles (optimitzades per al seu processat en programari CRP), amb un alt solapament. Es van realitzar un conjunt total de 171 imatges, en 21 passades d'entre 4 a 12 imatges.

Degut a la forma de cubeta de l'escena a representar, les passades es van realitzar tant en sentit longitudinal com transversal, i en direccions tant quasi-verticals, des d'una passarel·la de bastida per a la reproducció del fons, com obliqües per modelitzar les parets laterals d'excavació i sitges. Les imatges obtingudes es van utilitzar directament per al processat, evitant fer-hi cap modificació que pogués alterar la informació de color o luminància dels píxels.



Il·lustració 5-2. Composició panoràmica de passada de 10 imatges quasi-vertical des de la passarel·la existent (visible a la part inferior).



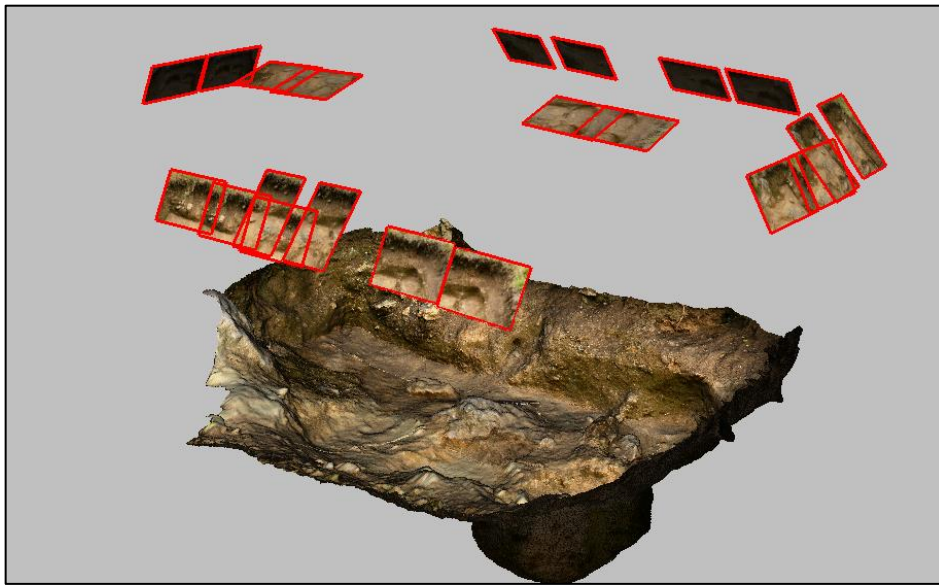
Il·lustració 5-3. Composició panoràmica de passada de 8 imatges obliqua.

De les 171 imatges preses, a l'haver-n'hi nombroses de redundants i per optimitzar els temps de processat, se'n van fer una selecció. Per al programa Image Master es va treballar amb un grup de 21 imatges, mentre que per als programes SFM se'n va utilitzar un grup de 48 que garantien un alt solapament des dels diversos punts de vista, permetent als programes una bona solidesa per relacionar la posició relativa de les càmeres.

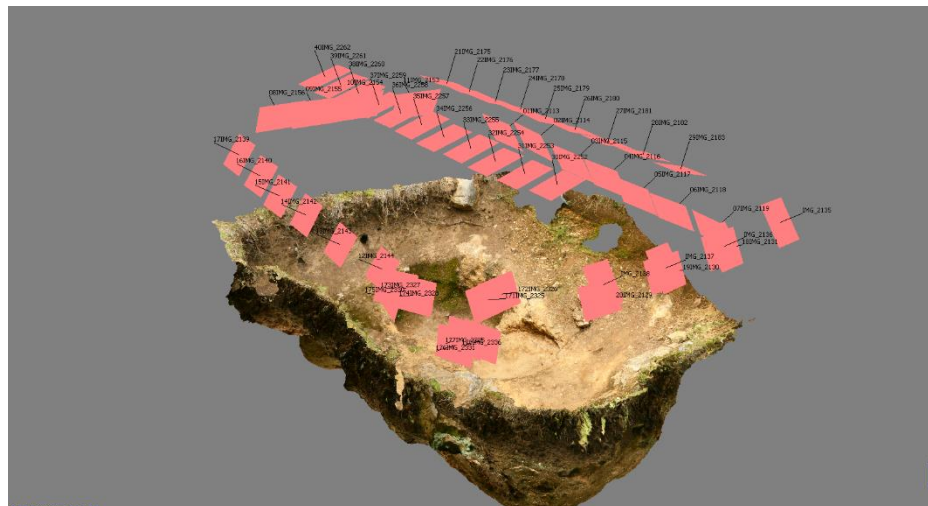
Les característiques i disposició de les fotografies són a la taula i il·lustracions següents:

Resolució (px)	Focal (mm)	Obertura F	Velocitat (s)	ISO
3504 x 2336 (8 Mpx)	24	4.5	1/30 – 1/200	125

Taula 5-1. Sitges: característiques de presa d'imatges



Il·lustració 5-5. Disposició de les 21 imatges utilitzades per al processat d'Image Master



Il·lustració 5-4. Disposició de les 48 imatges utilitzades en els processats SFM.

Les imatges es van realitzar amb prioritat a l'obertura, mantenint-la constant a 4.5, i un nivell d'il·luminació constant en totes les imatges. Tot i que hagués estat més fidedigne

mantenir constant l'obertura i velocitat per reproduir la il·luminació relativa de l'escena, les variacions d'il·luminació eren considerables, per això es va optar per mantenir constant el nivell d'il·luminació de les imatges i poder extreure'n el màxim detall, evitant zones massa fosques o clares, tot i que això pugui dificultar lleugerament el processat de les imatges o l'acabat de les textures. A l'hora de la veritat, però, no hi ha hagut problemes remarcables en aquests sentits.

La presa d'imatges es va realitzar a una distància d'entre 3 i 5 m del terreny. Per a una mida de píxel de 0.0062 mm (segons calibratge efectuada, veure Annex 1) i una focal de 24 mm la petjada de píxel màxima és de 1.3 mm.

Distància focal	24 mm
Dist. màx. Càmera-objecte	5 m
Escala fotografia E	208.333
Mida del píxel del sensor	0.0062 mm
Petjada de píxel sobre terreny	1.3 mm

Taula 5-2. Sitges: mida de píxel sobre terreny

5.1.1.3. Punts de referència

Per a la posterior georeferenciació del model cal donar coordenades a un conjunt de punts que puguin ser identificables a les imatges o textures finals. Aquests punts poden ser punts naturals si hi ha la possibilitat de documentar-los clara i inequívocament i, sobretot, si l'escena a reproduir és inaccessible. És recomanable que aquests punts estiguin situats en llocs plans (perquè els diferents punts de vista no es prestin a confusió i el punt mesurat sigui el mateix que s'aprecia a la imatge, cal evitar cantonades i canvis de plans) i en una cantonada ben definida de canvi clar de contrast o color (perquè tingui la millor definició). També es poden distribuir per l'escena un conjunt de dianes o senyals als quals se'ls donarà coordenades, i que hauran d'estar, també, clarament identificats per evitar confusions.

Per referenciar el model en aquest cas es van situar prèviament a la presa d'imatges un conjunt de punts de control dels quals se'n van obtenir coordenades des del marc de referència del jaciment. Els punts de control es van materialitzar amb una xinxeta sobre plastilina de colors variats vius per tal de tenir bona visibilitat a la imatge i evitar confusió entre punts de control propers (aquest tipus de senyal aporta molta flexibilitat en zones com aquesta, de terreny



Il·lustració 5-6. Fragment d'imatge, amb 3 punts de control visibles

irregular i poca adherència, i poden ser retirats fàcilment). Aquests es van radiar amb estació total (Topcon IS3) des d'una estació propera pròpia del jaciment, obtenint doncs coordenades en el propi sistema de referència (veure ANNEX 3 – Coordenades i situació de punts de recolzament a zona de sitges.).

5.1.2. Processat de dades

5.1.2.1. Maquinari

En la línia del treball, per a les proves s'ha pretès utilitzar hardware informàtic amb característiques mitjanes, pensant que en un jaciment probablement no es realitzarà una despesa significativa en costos maquinari especialitzat d'alts recursos gràfics. S'ha disposat, doncs, de dos ordinadors que teníem a l'abast, principalment un portàtil Lenovo ideapad 320 amb processador i7-8550U a 1.80GHz, GPU NVIDIA GeForce MX150 de 4Gb i 8Gb de RAM i disc dur HDD d'1Tb i també una torre HP amb processador Intel Core i7-6700 a 3,40GHz i 16Gb de memòria RAM.

5.1.2.2. Dades

Per alimentar el processat i com a resultat final, s'han utilitzat aquestes dades mínimes:

Dades d'entrada:

- Fotografies (21 imatges per a ImageMaster i 48 per als programes SFM)
- Llistat de punts de recolzament (veure ANNEX 3 – Coordenades i situació de punts de recolzament a zona de sitges.)

Dades de sortida:

- Arxiu de malla .obj (amb arxius de textura de configuració associats, que caldrà mantenir junts)

Per a la sortida de dades s'ha optat pel format .obj, el qual compartien tots els programes facilitant-ne l'intercanvi, i que està format en aquest cas per tres o més arxius. Aquests s'hauran de mantenir sempre junts per al seu correcte reconeixement:

- .obj: la malla triangular
- .png/jpg/...: arxiu o arxius d'imatge de la textura
- .mtl: arxiu o arxius de text amb informació de materials, i que relaciona la malla amb la textura, entre d'altres.

Evidentment caldrà documentar el més detalladament possible les condicions de presa d'imatge, característiques, localització, escena representada... per crear el conjunt de metadades que en descriguin concretament el context i característiques (4) i que s'arxivaran juntes, com a mínim amb les dades d'entrada i també les resultants per a qualsevol possible ús posterior.

Amb aquest conjunt de dades s'han iniciat els diferents processos de modelització amb els diferents programes disponibles:

5.1.2.3. Programari: Image Master

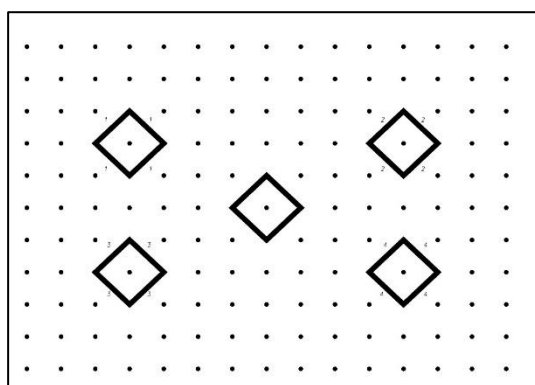
El processat amb Image Master és el més proper a la fotogrametria clàssica, amb els passos d'orientació interna (calibratge de la càmera) identificació de parells d'imatges,

determinació manual de punts comuns, orientació externa i creació de models tridimensionals per parells d'imatges.

Calibratge

El primer pas en el processat amb Image Master és la calibratge de la càmera, amb el mòdul independent Image Master Calib. Aquest és un pas imprescindible per continuar el procés posteriorment.

El programa de calibratge es basa en la impressió d'un patró en un full de paper, el qual cal fotografiar des de cinc posicions (frontal, picat, contrapicat, esquerra i dreta) tal com s'indica en les instruccions. Un cop realitzades les fotografies aquestes s'importen al programa per tal d'obtenir les característiques geomètriques de la càmera. El resultat del procés és un informe amb els valors resultants i un arxiu amb extensió .cmr que podrà ser importat directament al mòdul principal d'Image Master (veure ANNEX 2 – Calibratge de càmera (Image Master Calib)).



Il·lustració 5-7. Image Master Calib, patró imprimible per a fotografiar.

El programa calcula els set paràmetres següents, en aquest cas amb els valors:

- **Distància focal** f : 24.171312m
- **Distorsió radial** $K1$: 0.0001855412, $K2$: -2.190699e-007
- **Distorsió tangencial** $P1$: -4.690703e-006, $P2$: -7.895803e-006
- **Punt principal** X_p : 10.768494, Y_p : 7.072454

La mida del píxel que calcula és de 0.0062 mm

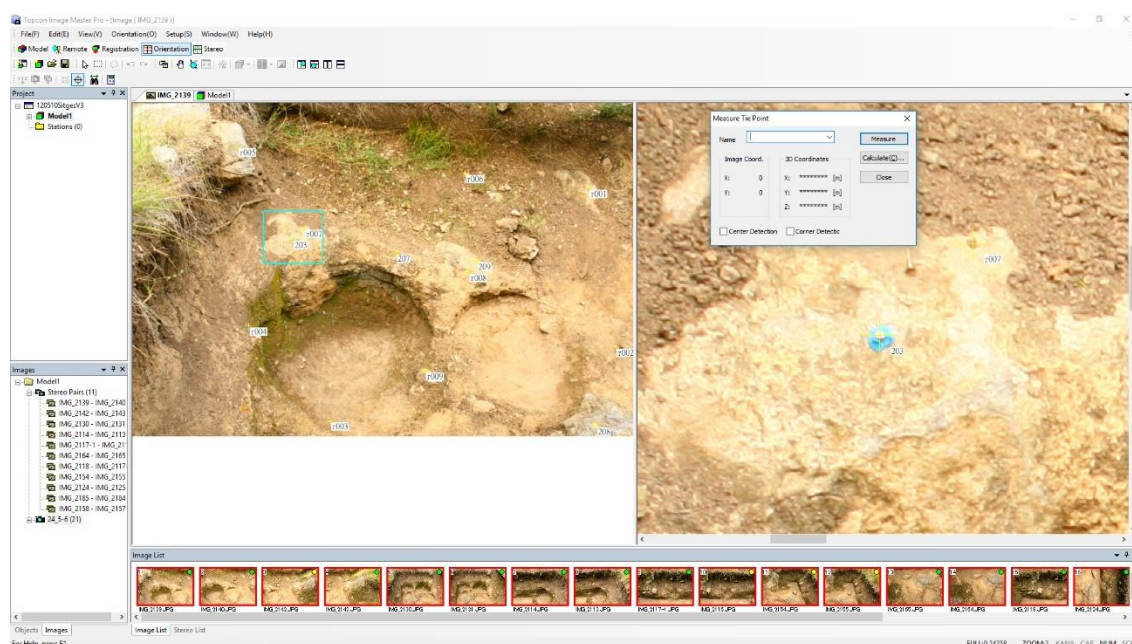
Càrrega d'imatges, punts de recolzament i identificació de parells

Un cop calibrada la imatge es passa al mòdul principal, on el primer que caldrà fer serà crear un nou projecte, i els primers passos a seguir seran la importació de les imatges i punts de control, tasca que es realitza des de l'entorn d'Orientació.

Al l'entorn *Orientation* es fa la càrrega d'imatges i la càmera associada (l'arxiu .cmr resultant de la calibratge). Importarem també el conjunt de coordenades de punts de control per a fer l'orientació i georeferenciació.

El següent pas és crear els parells d'imatges (el programa ho pot fer automàticament seleccionant tot el conjunt d'imatges) i s'inicia la identificació de punts comuns, que han d'incloure els punts de recolzament.

Un cop mesurats un mínim de 8 punts corresponents sobre cada parell d'imatges que cal seleccionar manualment (amb assistència per a trobar el corresponent), es pot calcular l'orientació. El programa indica si la qualitat és acceptable amb un OK per a cada parell, i una petita marca verda o groga (o vermella) a cada fotografia.

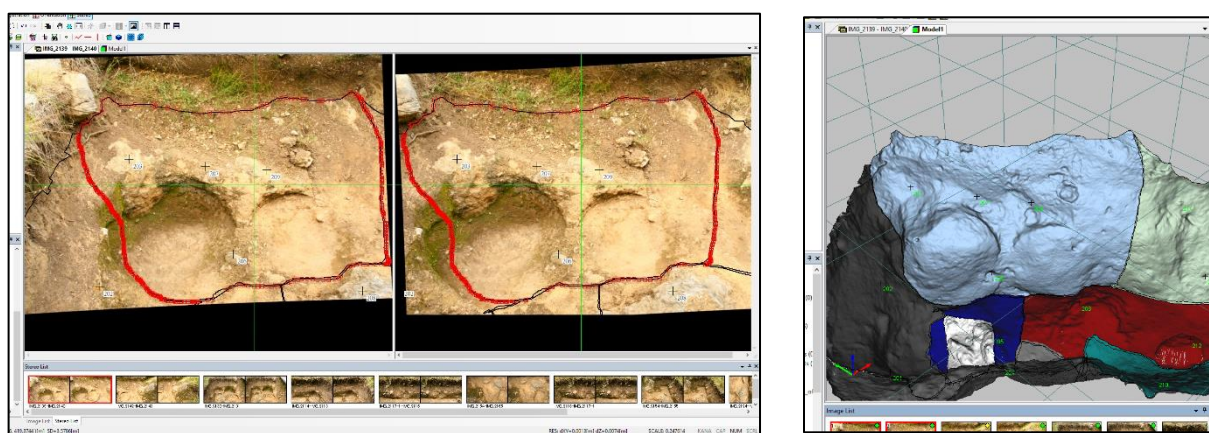


Il·lustració 5-8. Image Master: mesura de punts de control sobre les imatges.

Creació del model tridimensional

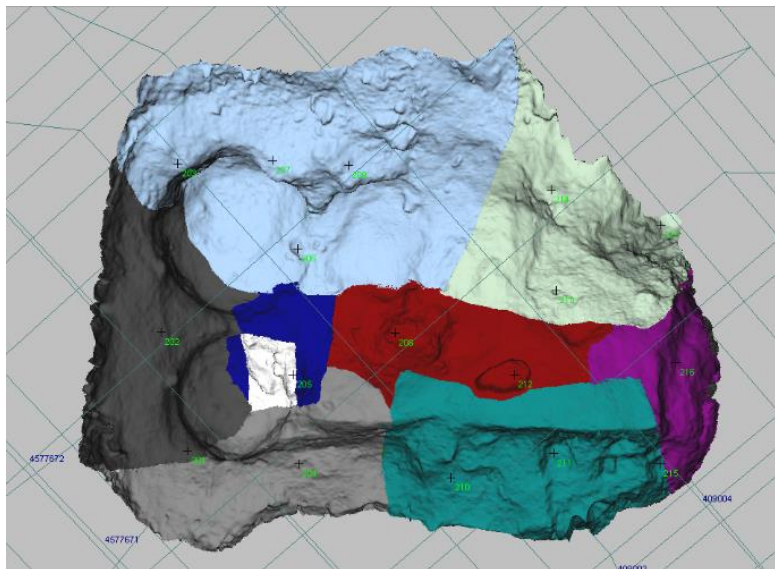
Amb els parells d'imatges orientats, es pot procedir directament a la creació de la malla, Image Master no realitza prèviament el càlcul d'un núvol de punts. Això es realitza en l'entorn Stereo per a cada parell de fotografies, triant per a cada zona el parell que dona millor cobertura. Cal delimitar la zona a modelar amb el dibuix d'una polilínia de contorn, i si s'escau es podrien dibuixar línies de trencament.

El programa permet triar la densitat de la malla (en aquest cas s'ha realitzat de 5 mm) i en fa un càlcul força ràpid. Repetint el procés per a cada parell d'imatges, la superfície resultant és un conjunt de pedaços. Per a tenir una bona unió entre ells cal que la polilínia de delimitació de la zona en la que es crearà la malla coincideixi amb la de la zona adjacent. Tot i així les malles no queden perfectament unides, quedant un petit espai o superposició entre elles (de pocs mil·límetres en aquest cas).



Il·lustració 5-9. Image Master: parell d'imatges orientat amb polilínia de delimitació per a creació de malla (esq.) i resultat, en cian (drt.)

Un cop creada la malla triangular, per a afegir-hi la textura (des de l'entorn *Model*) s'ha de treballar sobre cada fragment de malla, seleccionant les fotografies corresponents, i prement, només, el botó corresponent. El programa dona l'opció de definir la resolució de la textura (s'ha deixat l'opció per defecte d'1 mm/píxel, proper a la petjada màxima del píxel sobre el terreny).

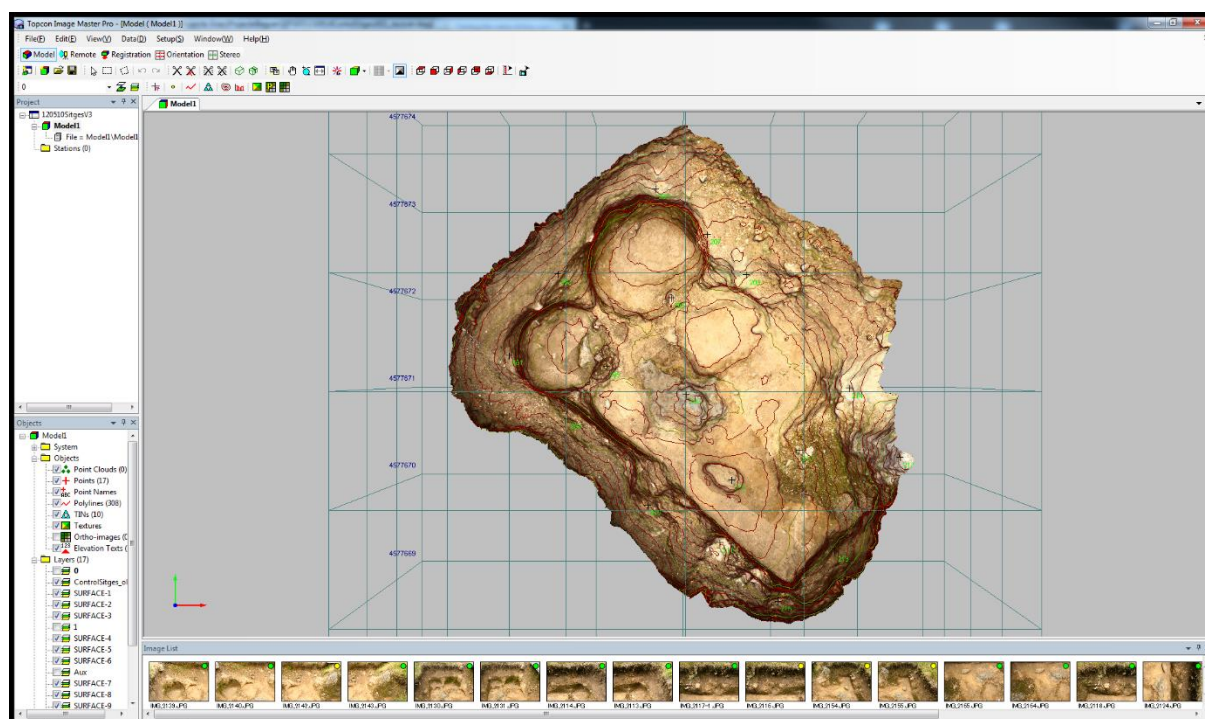


Il·lustració 5-10. Image Master. Malles triangulars generades per cada parell d'imatges.

Finalment s'hi poden generar corbes de nivell per a una millor visualització dels desnivells o simplement com a referència altimètrica. El programa permet alguna altra opció més, de representació, la possibilitat d'obtenir seccions per una línia determinada...

Finalment s'exporta el model resultant de malla i textura al format .obj

La malla resultant té 1.6 milions de cares, amb unes 800000 cares, i una resolució mitjana d'uns 5-6 mm.



Il·lustració 5-11. Topcon Image Master: model acabat amb malla, punts de control, textura i corbes de nivell.

5.1.2.4. Programari: Photoscan

Photoscan és un programa SFM, i segueix els passos bàsics següents:

1. Càrrega d'imatges
2. Aliniació d'imatges (detecció de punts comuns, correspondència, càlcul de posicions de càmera i dels punts comuns)
3. Georeferenciació (càrrega i assignació de punts de recolzament, només en la versió Pro)
4. Densificació del núvol de punts
5. Creació de malla triangular
6. Assignació de textura

El programa té la capacitat de fer una calibratge de càmera, projectant a la pantalla de l'ordinador una quadrícula que cal fotografiar des de diferents punts de vista i carregant les imatges per càlcul dels paràmetres geomètrics i de distorsió de la lent. Aquest pas és opcional, i en el manual del programa menciona que pot servir d'ajuda en casos de poc solapament d'imatges. Al prioritzar la flexibilitat i facilitar d'ús de les eines provades, en principi es va prescindir d'aquest pas per veure si era un impediment, sense que sembli que hagi afectat els resultats.

El procés que s'ha realitzat en les dues versions i que es descriu aquí ha estat el mateix, excepte en el pas d'assignació dels punts de recolzament per a georeferenciar el model que la versió Standard no permet.

Càrrega d'imatges, definició de màscares i alineació

El treball s'inicia amb la creació d'un nou projecte. A partir d'aquí pràcticament tots els passos bàsic es troben ordenats al menú *Workflow*, la qual cosa en facilita l'ús en tot el procés.

Aquest s'inicia amb la càrrega d'imatges i si es desitja s'hi definiran les màscares d'ocultació d'elements estranys o irrellevants per a l'escena i impedir que apareguin al model o textura. Les màscares es poden exportar per ser reutilitzades.



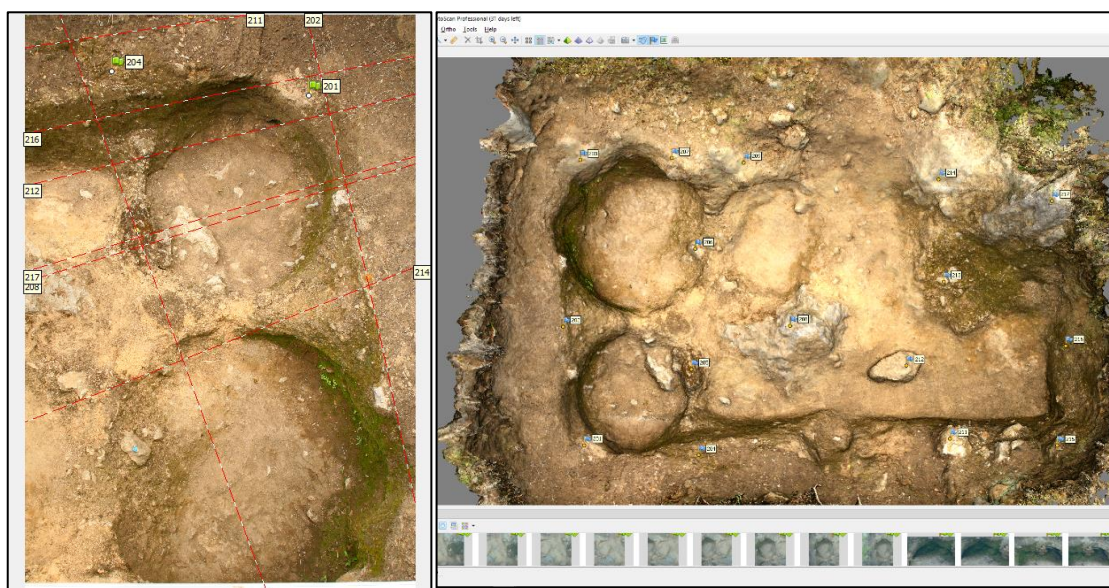
Il·lustració 5-12. Photoscan: màscara en foto i exportació d'aquesta en arxiu d'imatge.

El següent pas és l'alineació d'imatges, que inclou la detecció de característiques comuns, el càlcul de la orientació interna i externa, i la creació del núvol amb els punts comuns (*sparse cloud*). En cada pas s'ofereix un menú per a manipular certs paràmetres corresponents (Il·lustració 5-14), els quals són presentats d'una forma senzilla, amb els valors traduïts a l'estil

Low – High per facilitar-ne la interpretació. Utilitzant els paràmetres a màxima qualitat l'alineació es realitza amb uns 55000 punts.

Georeferenciació (només versió Pro)

Posteriorment, i només en la versió Pro, és la georeferenciació. A la pestanya *Reference* del panell dret s'hi pot definir el sistema de coordenades (en aquest cas el jaciment està referenciat al sistema oficial ETRS89) i permet importar un llistat de punts de control. Un cop fet això el procés és força senzill, treballant directament sobre les imatges i amb molta ajuda automatitzada: es van assenyalant els punts de recolzament a cada imatge. A l'assignar un punt per primera vegada apareixen les línies epipolars d'aquests en les altres imatges corresponents (Il·lustració 5-13, esq.), i un cop s'inserta en dues imatges ja apareix la posició aproximada en la resta d'imatges, que només cal confirmar o afinar.

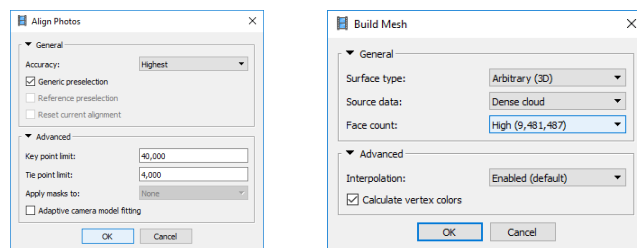


Il·lustració 5-13. Photoscan Pro, georeferenciació. Assistència en l'assignació de punts de recolzament (esq.) i model georeferenciat.

Un cop assignats tots els punts, un total de 15, el panell esquerra presenta els residus per a cada punt, que han estat de valors màxims al voltant de 5 mm. S'ha detectat un punt amb un residu més alt, d'uns 2 cm, (punt 201) que ha estat eliminat de la transformació. Des d'aquest moment el núvol i següents passos ja estan georeferenciats.

Densificació Núvol

El següent pas és densificar el núvol de punts i posteriorment generar la textura. Tots aquests passos es poden seqüenciar en el mode *Batch Process* per a un processat desassistit.



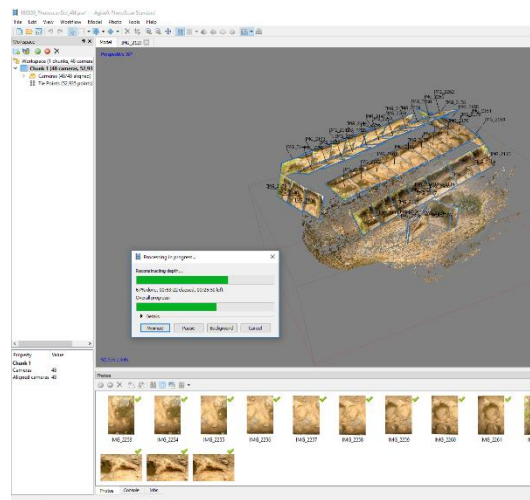
Il·lustració 5-14. Photoscan. Exemples de quadres de diàleg de paràmetre.

Amb els paràmetres a màxima qualitat, s'ha obtingut un núvol de molt alta densitat, d'uns 48,5 milions de punts, de la qual se n'ha generat un malla d'uns 10 milions de cares que al ser exportada a .obj representa 4.8 milions de vèrtexs i resolució d'entre 2-4 mm.

Georeferenciació (Standard): Cloud Compare

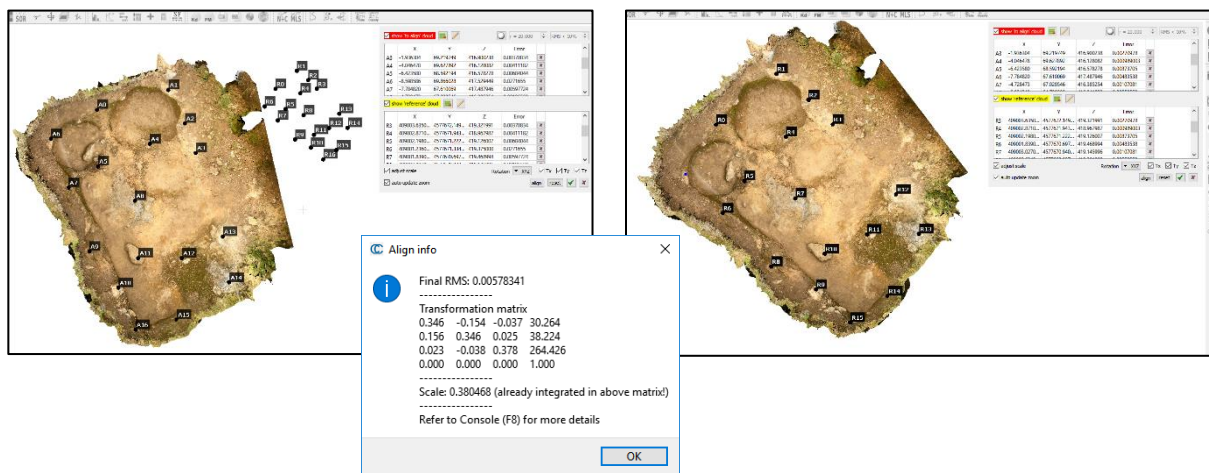
Pel que fa al resultat de Photoscan Standard, tot el procés s'ha realitzat de la mateixa manera (tot i que amb paràmetres de qualitat més moderats, obtenint un model de 15 milions de cares, suficients per al nostre cas). La diferència ha estat l'omissió del pas de georeferenciació, no disponible. Aquesta caldrà realitzar-la externament i s'utilitzarà CloudCompare per aquesta tasca.

La introducció dels punts de recolzament es pot fer de dues maneres, important un arxiu de punts (.txt) o introduint-ne manualment les coordenades.



Il·lustració 5-15. Photoscan Standard: Processat de la malla.

Primer s'importa l'arxiu de malla (.obj en aquest cas, i amb correcta visualització de la textura) i l'arxiu de punts. A aquests, en coordenades UTM ETRS89, fus 31N, el programa els aplica una translació perquè no pot treballar amb valors tan alts, però els manté en memòria per tornar a aplicar el desplaçament invers a l'exportació. Així, el model, a l'exportar-lo, quedarà també en coordenades UTM. L'eina per fer la transformació és *Align (point pairs Picking)*, i consisteix en anar indicant el centre de les dianes que apareixen al model i assignar-los, o bé manualment les seves coordenades o clicant sobre els punts importat respectivament, els del sistema



Il·lustració 5-16. Photoscan Standard: Georeferenciació a CloudCompare

jaciment. En aquest cas treballem sobre el model i no directament sobre les imatges, el que pot dificultar una mica més la identificació i precisió si el model, en la zona de la diana, no acabés d'estar ben definit.

Tal com es van introduint els punts apareix una estimació del residu de cada un d'ells. En aquest cas s'ha observat que un dels punts (núm. 201) presentava un error considerablement superior als de la resta, i per aquesta raó s'ha eliminat del càlcul de la transformació. Un cop acceptada la resta, només queda alinear i acceptar el canvi de coordenades. El programa ofereix aleshores la matriu de transformació aplicada. (Il·lustració 5-16).

Resultats:

Màxima qualitat:

- Núvols de 48.5 M de punts, amb informació de color.
- Arxius .obj de 10 M de cares i 4.8 M de vèrtexs amb resolució d'uns 2-3 mm.

Alta qualitat:

- Núvol de 15 M de punts amb informació de color.
- Arxiu .obj de 2 M de cares i 1.2 M de vèrtexs, amb una densitat d'uns 8 mm.

5.1.2.5. Programari: VisualSFM + Meshlab + CloudCompare

Com s'ha comentat, VisualSFM prové de l'àmbit de la recerca, i es tracta d'un programa gratuït que es pot baixar directament de la pròpia web.

El programa no necessita instal·lació, i es pot executar des d'on s'hagi descomprimit el fitxer que en conté tots els arxius.

La finestra de consola dona informació i detalls dels processos que es realitzen, però el programa no ofereix la possibilitat de modificar fàcilment paràmetres, havent de recórrer a l'edició de fitxers de text de configuració. En aquesta avaluació, en la qual es cerquen processos senzills, s'han utilitzat els paràmetres per defecte. Com a resultat, el procés és el més simple dels analitzats, limitant-se el seu funcionament, gairebé literalment, a prémer quatre botons. Per altra banda això vol dir que si un processat falla serà difícil de recuperar al no poder fer ajustos de paràmetres vista la complexitat de modificar-los.

A l'obrir apareix una finestra en blanc, la consola també en blanc i una barra de botons. En la pròpia web del programa s'indica els quatre únics passos a realitzar:



Il·lustració 5-17. VisualSFM: Controls i passos bàsics (extret de la web de l'autor)

1. Càrrega d'imatges (el botó +).
2. Detecció i correlació de punts comuns.
3. Reconstrucció de posicions de càmeres i punts detectats.

4. Densificació del núvol de punts.

El procés de VisualSFM acaba amb el núvol de punts. La feina es continuarà al programa de gestió de malles tridimensionals Meshlab:

5. Importació del resultat de Visual SFM
6. Creació i depuració de malla
7. Assignació de textura

Per últim la georeferenciació es realitzarà a CloudCompare

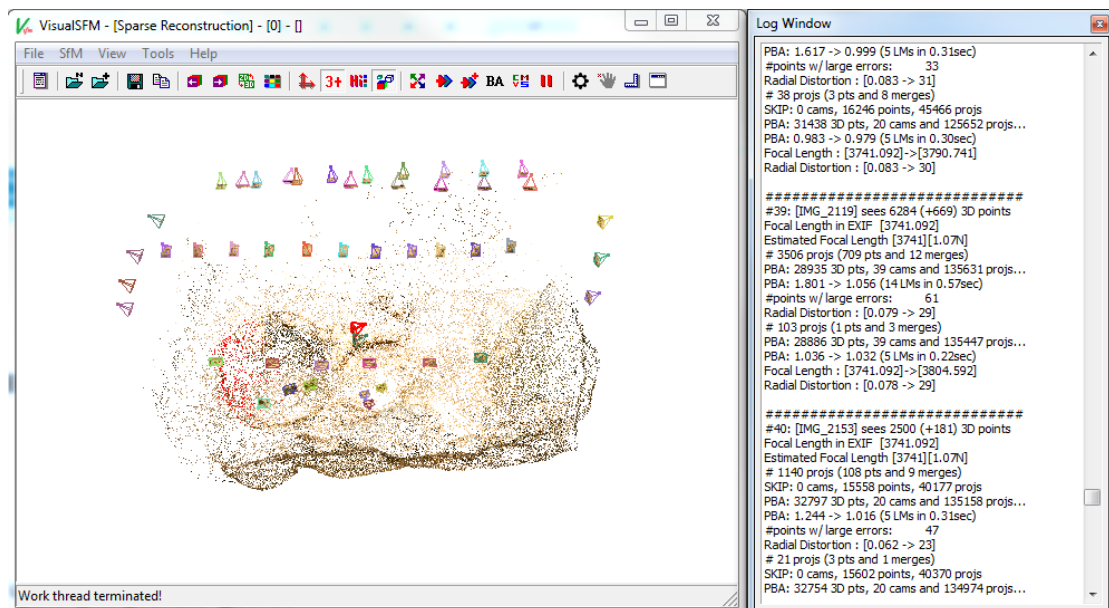
8. Georeferenciació

Càrrega d'imatges

Per carregar un conjunt d'imatges només cal prémer el botó corresponent (+) i seleccionar les imatges necessàries.

Detecció i correlació de punts comuns

Un cop carregades les imatges es realitza la cerca de correspondències entre imatges amb *Compute Missing Matches*. Això es fa en dos passos, primer al programa localitza característiques comuns aplicant l'algorisme SIFT per tot seguit cercar-ne correspondències entre totes les combinacions possibles d'imatges.



Il·lustració 5-18. VisualSFM: Reconstrucció 3D i càlcul de posició i paràmetres de càmeres

Reconstrucció de posicions de càmeres i punts detectats

Un cop acabat es passa a l'anomenada *sparse reconstruction*, pas que realitza el càlcul de posicions de càmera i mostra el núvol realitzat amb els punts identificats al pas anterior (Il·lustració 5-18). Aquest programa treballa amb el mètode seqüencial, triant un parell d'imatges per inicialitzar i posteriorment va afegint la resta. En alguns casos pot passar que presenti dificultats a alinear totes les imatges, i aleshores crea models independents. No hi ha paràmetres per intentar corregir això, per tant es recomanable assegurar-se bé en la presa d'imatges que n'hi ha prou i amb un bon solapament.

Densificació del núvol de punts

Per últim s'efectua la *Dense reconstruction* que crearà el núvol complet de punts. Cal tenir en compte que aquest procés pot trigar hores en completar-se, segons el nombre d'imatges i les capacitats de l'ordinador utilitzat. En aquest pas final s'obté ja el núvol dens de punts, amb informació de color en cada un d'ells. Per a completar la creació de la malla s'haurà de continuar el procés a Meshlab. A l'iniciar el procés de densificació el programa sol·licita el nom d'una carpeta de sortida i un format o estructura de fitxers. Triant .nvm.csv es facilita el posterior trasllat a Meshlab, ja que aquest reconeixerà tota la informació (situació de càmeres i núvol dispers i imatges associades), per la qual cosa és senzill acabar la malla texturitzada.

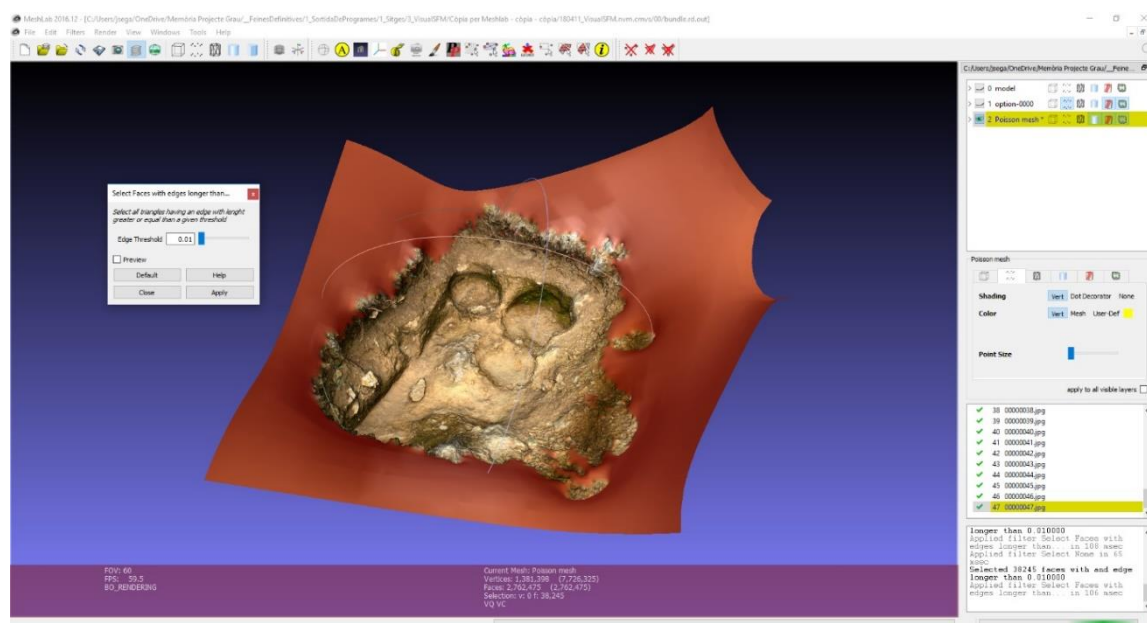
Importació a Meshlab

A Meshlab cal obrir projecte i cercar a la carpeta d'exportació de VisualSFM primer l'arxiu *bundle.rd.out* i posteriorment l'arxiu *list.txt*, obtenint així el núvol dispers (no necessari posteriorment) i les imatges del projecte orientades. Després s'importa el núvol dens de punts (arxiu .ply a la carpeta models).

Creació de malla

Sobre aquest s'hi crea la malla, en aquest cas mitjançant l'algorisme *Screened Poisson Reconstruction*. La malla resultant caldrà netejar-la en els seus contorns de grans triangles que s'acostumen a generar. Hi ha una eina per seleccionar cares amb longituds majors que un valor que se li indiqui que pot servir en aquesta tasca (Il·lustració 5-19). El resultat és una malla d'uns 2 milions de cares (resultats diferents segons paràmetres de càlcul), i una resolució mitjana d'uns 5 mm.

Assignació de textura:



Il·lustració 5-19. Meshlab, malla i selecció de triangles sobers amb eina de selecció segons longitud d'arestes.

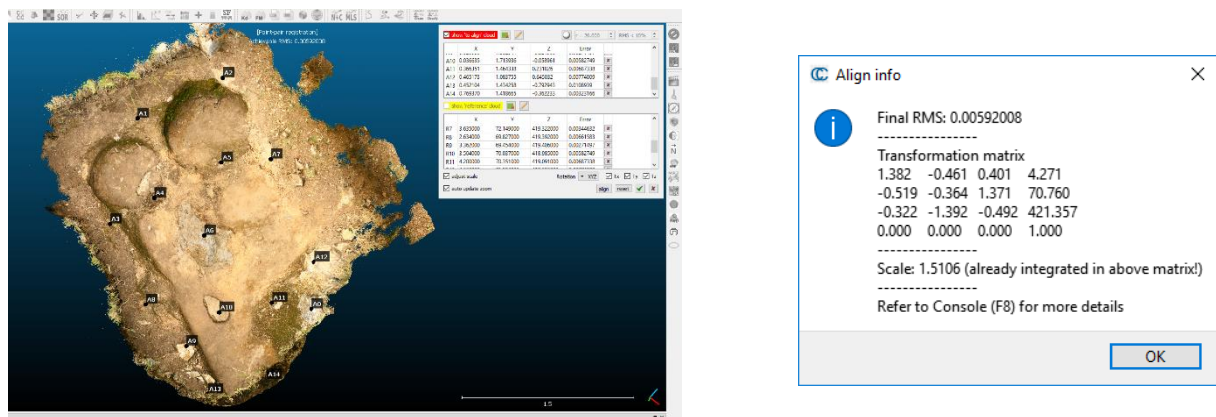
Finalment només falta aplicar la textura amb l'eina *Parametrization + texturing from registered raster*, on haurem d'indicar la seva mida en píxels, obtenint així el resultat final que podem exportar en format .obj. Cal dir que la representació del color ha estat molt diferent

respecte de les fotografies originals, potser degut a algun paràmetre d'il·luminació, ja que la textura exportada manté el color original. Per altra banda, tot i no utilitzar màscares, la textura no conté cap de les passarel·les que apareixen a d'altres programes (Regard3D o el mateix Photoscan si no s'apliquen).

Georeferenciació

L'últim pas s'ha realitzat a CloudCompare amb l'opció de registre de punt, tal com s'ha descrit al procés de Photoscan Standard. Per a la realització primer s'importa l'arxiu de malla (.obj en aquest cas, i amb correcta visualització de la textura).

Un cop seleccionat els punts de recolzament s'ha tornat a comprovar que el punt 201 i (i en menor mesura el 207) tenien uns residus superiors a la resta, i s'han eliminat del càlcul. L'error final RMS és del voltant de 6 mm.



Il·lustració 5-20. CloudCompare, georeferenciació del model VisualSFM

Resultat:

- Núvol de 6,28 M de punts amb informació de color (de VisualSFM).
- Arxiu .obj amb Malla de 13,7 M de vèrtexs i 27,2 M de cares i d'uns 5 mm de resolució mitjana) (Meshlab, paràmetres mitjans)

5.1.2.6. Programari: Regard3D

Regard3D és un programa també de SFM i comparteix els passos amb Photoscan Standard, realitzant tot el procés des de la càrrega d'imatges fins a l'obtenció d'un núvol dens de punts, malla i textura.

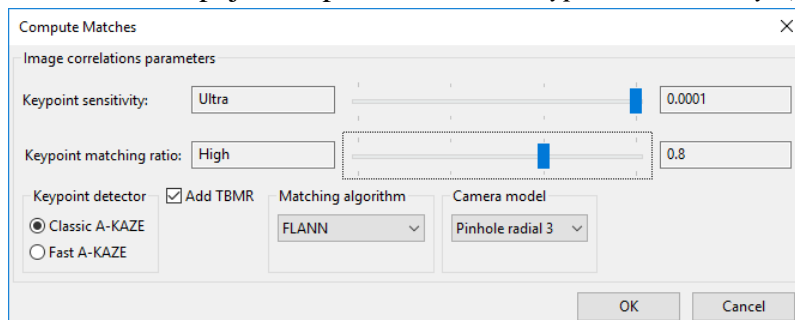
Inici de projecte i càrrega d'imatges

El primer que demana el programa és iniciar un nou projecte amb la designació d'una ubicació on anirà desant els resultats i passos intermitjos del procés. Un cop creat l'espai de treball, al panell lateral esquerra es mostraran els diferents processos efectuats i els botons per a les diferents opcions dels passos a seguir. Des d'aquest panell lateral, on hi apareix cada pas efectuat, s'hi poden bifurcar diferents branques de processament. Així, partint d'una mateixa alineació, es poden crear diferents núvols de punts fent proves amb els valors de paràmetres, però mantenint sempre el treball ja creat, la qual cosa ha resultat ser un bon recurs. El primer pas és per a la càrrega d'imatges, en el qual s'obre un diàleg per a la tria d'imatges a utilitzar.

Identificació de punts comuns en les imatges

Un cop seleccionat aquest conjunt d'imatges, a la barra lateral s'activa el botó de càlcul de punts comuns entre imatges, el qual obre la finestra corresponents. El programa ofereix a cada pas la possibilitat de modificar tots els paràmetres que condicionaran el seu comportament.

Tal com s'ha comentat, a la web del programa (16) s'ofereix documentació i recomanacions per a la gestió dels paràmetres de càlcul. En aquest cas per exemple va caldre fer diverses proves havent de pujar els paràmetres de *Keypoint sensitivity* (número de punts



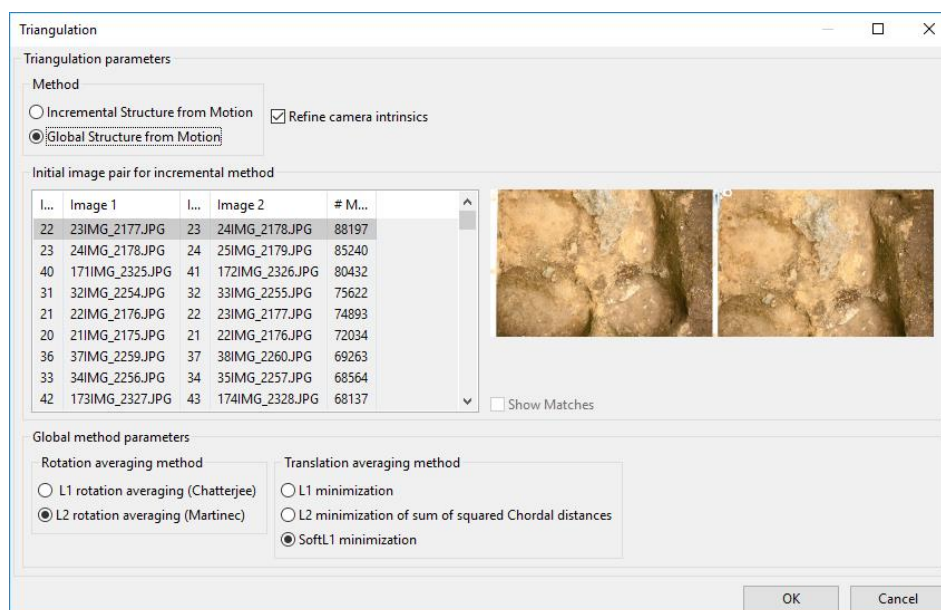
Il·lustració 5-21. Regard3D: Finestra de paràmetres per al càlcul de punts comuns entre imatges amb els paràmetres utilitzats..

detectats) i *Keypoint matching ratio* (qualitat de la correspondència), així com activar *Add TBMR* (un segon detector de punts) (Il·lustració 5-21) per tal de trobar suficients punts que possibilitessin, posteriorment, triangular totes les càmeres.

Un cop realitzada la detecció de punts comuns, aquesta apareix en l'arbre del panell esquerra del programa, i seleccionant-la s'activa el botó de triangulació, amb els seus paràmetres corresponents.

Triangulació

El programa ofereix els dos mètodes de càlcul dels elements geomètrics de càmera les seves posicions (incremental o global).



Il·lustració 5-22. Regard3D: Finestra de paràmetres per a la triangulació de la posició de càmeres, amb els paràmetres utilitzats.

En aquest cas s'ha utilitzat l'opció *Global Structure from Motion* (proves amb l'opció *Incremental*, partint d'un parell d'imatges anant-ne afegint, no van donar bons resultats).

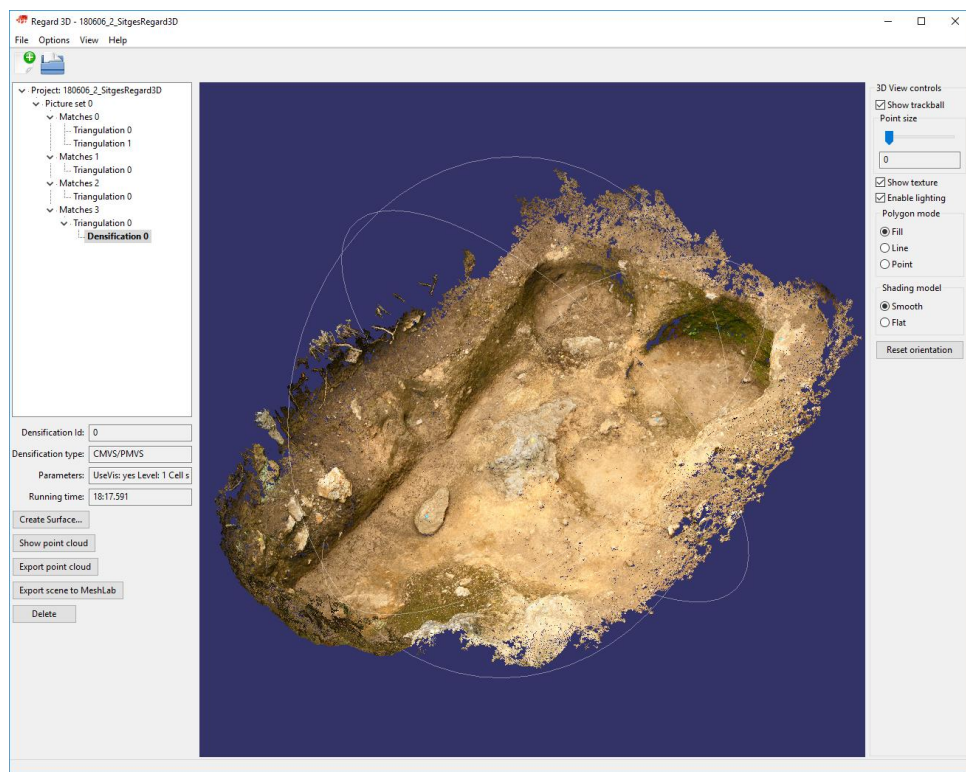
Un cop finalitzada la triangulació de les posicions de les càmeres, podent-se haver calculat totes, i amb el corresponent núvol "dispers" (format pels punts comuns utilitzats en les imatges), i seleccionada aquesta, s'activa el botó de la Densificació, el qual activa la finestra corresponent.

Densificació

El mètode utilitzat és el CMVS/PMVS, de Yasutaka Furukawa (el mateix que trobem a VisualSFM), l'únic, de fet, que es pot utilitzar si la triangulació s'ha realitzat amb el mètode *Global Structure from Motion*.

En les diferents proves realitzades, s'ha anat forçant el càlcul per incrementar la resolució del núvol final fins a esgotar les capacitats de l'ordinador. El paràmetre *Level* s'ha deixat a nivell 1, que tot i que redueix la resolució de les imatges a la meitat, el manual suggereix fer això, ja que la utilització de sensors Bayer en la majoria de càmeres digitals interpola, de fet, la informació de color per a cada píxel. Per això la disminució de resolució en realitat no redueix massa la informació real captada, agilitzant notablement el càlcul.

La densitat de la reconstrucció es controla amb *Cell size*.

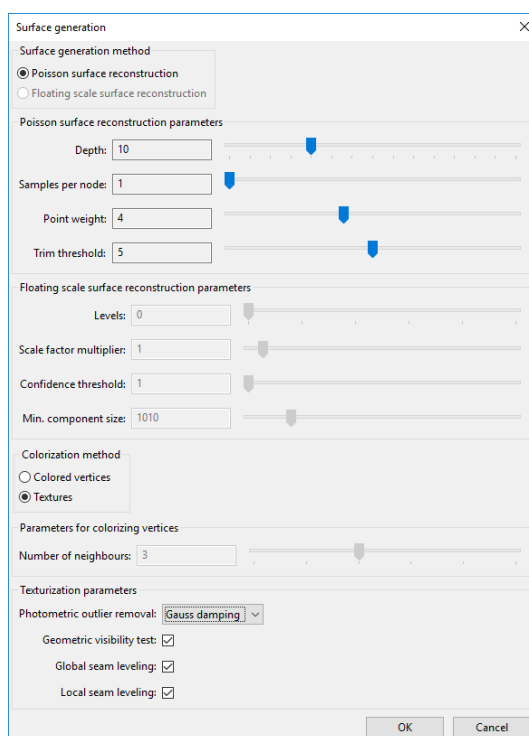


Il·lustració 5-23. Regard3D: resultat de densificació del núvol de punts..

El processat de la densificació va ser relativament ràpid, trigant uns 18min en l'ordinador portàtil. El núvol resultant amb els paràmetres indicats ha estat de 2,2 M de punts.

Superfície de triangles

L'últim pas que executa el programa és la creació de la superfície de triangles. Al seleccionar la densificació s'activa el botó de creació de superfície.

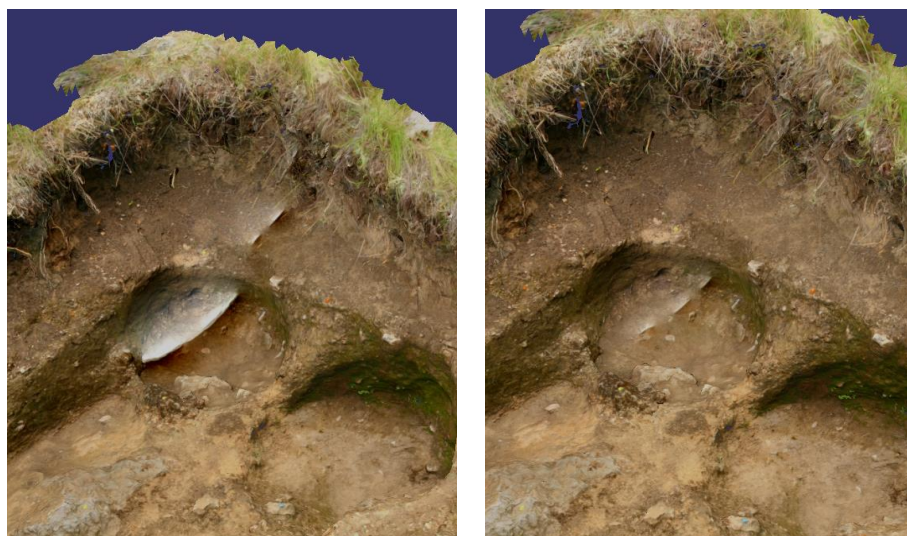


Il·lustració 5-24. Regard3D, finestra de generació de superfície, amb els paràmetres utilitzats.

En aquest cas, el paràmetre *Depth*, és el que controla la densitat de la superfície. Abans d'esgotar els recursos de l'ordinador disponible es va obtenint una superfície de 3300000 cares.

Textura

Per donar color a la malla s'ha generat una textura a partir del conjunt d'imatges. Cal dir que com que no hi ha la possibilitat d'utilitzar màscares en les imatges, alguna bastida ha acabat apareixent a la textura. Per tal de minimitzar-la (no s'ha pogut eliminar del tot), s'ha activat el paràmetre *Photometric outlier removal*, que intenta eliminar elements i obstruccions mòbils (que no apareixen en tots els punts de vista), del qual només l'opció *Gauss damping* ha funcionat significativament (). Cal doncs, en l'ús d'aquest software, tenir precaució a l'hora de prendre les imatges i evitar qualsevol element extern superposat al que hagi d'aparèixer en el resultat final.



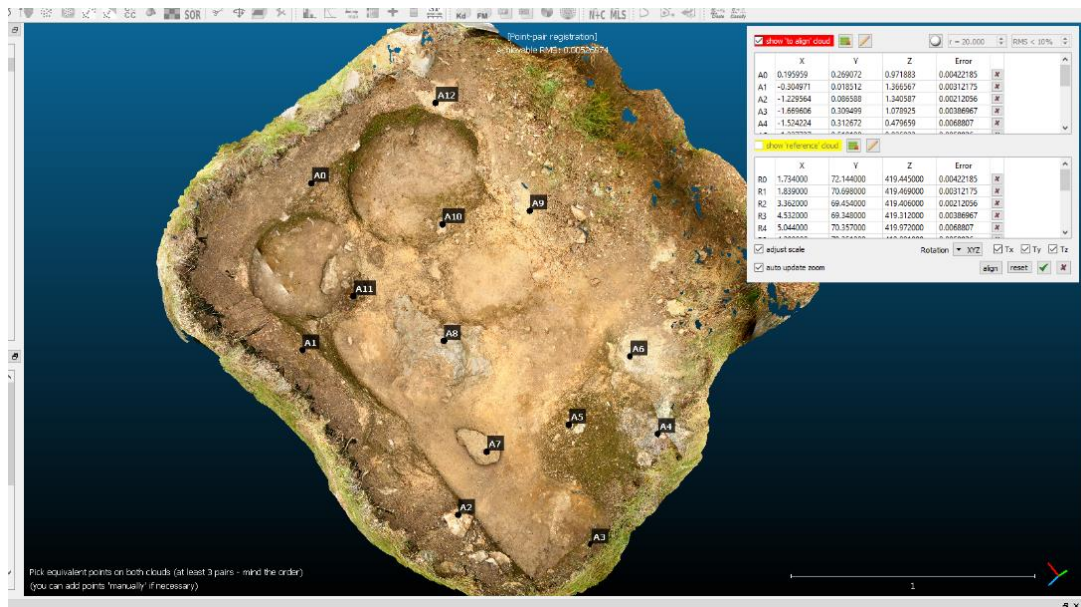
Il·lustració 5-25. Regard 3D: Malla resultant i diferència en l'ús (drt) de l'opció *Photometric outlier removal (Gauss damping)*

El programa ofereix a cada pas l'opció d'exportar els diferents elements que va generant en diferents formats per a l'ús en altre software. Exportem la malla texturitzada a format .obj per georeferenciar.

Georeferenciació

La malla i núvol resultants no estan escalats ni georeferenciats, per la qual cosa la feina s'haurà d'acabar a CloudCompare amb els passos descrits per a Photoscan Standard.

En el procés es va detectar també que el punt 201 tenia un residu considerablement superior a la resta, i, en menor mesura, el punt 207 i es van eliminar del càlcul, quedant 14 punts de recolzament. S'accepta i s'exporta la malla orientada per a la seva comparació.



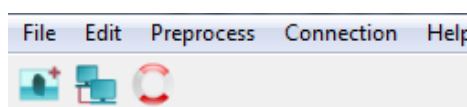
Il·lustració 5-26. Regard3D: Georeferenciació del model a CloudCompare

Resultat:

- Núvol de 2.2 M de punts.
- Malla amb 3.3 M de punts i 1.6 M de vèrtexs i 5 mm de densitat mitjana.

5.1.2.7. Programari: Arc3D

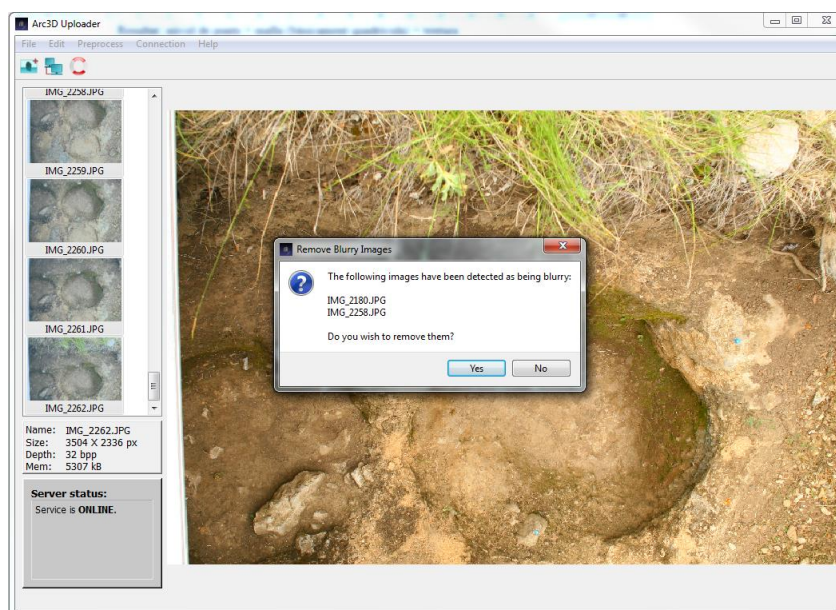
Aquest és un programari que, com s'ha comentat, opera al núvol de manera totalment automàtica. L'únic que cal instal·lar a l'ordinador és un petit software per a la creació del projecte i càrrega de les imatges i que té, a més, un parell de petites funcionalitats.



Il·lustració 5-27. Arc3D uploader: Controls

Primer es realitza la precàrrega d'imatges desitjada en el programa. En aquest punt, l'aplicació té una primera funcionalitat de detecció de fotos mogudes o borroses. En cas de detectar-ne (sovint s'ha d'executar la funcionalitat dues vegades, ja que en una primera passada no sembla detectar-ne mai cap), ofereix la possibilitat de suprimir-les de la precàrrega (en cas afirmatiu, és possible que l'aplicació deixi de funcionar, caldrà tornar a fer la precàrrega, sense la selecció manual de les imatges indicades). En el nostre cas, doncs, es van eliminar les dues fotos indicades (Il·lustració 5-28).

Un cop realitzada la precàrrega s'inicia la pujada de les imatges al núvol per al seu processat. En aquest punt el programa permet reduir la mida de les imatges mitjançant la indicació d'un percentatge, en cas que es cregui que la càrrega és massa lenta (amb la conseqüència que el model resultant serà de menor densitat).



Il·lustració 5-28. Arc3D uploader: Detecció d'imatges precarregades mogudes o borroses.

Un cop donada l'ordre de càrrega de les imatges, es demana el nom d'usuari i contrasenya i apareix un petit formulari per completar algunes metadades del treball.

Il·lustració 5-29. Arc3D: formulari de metadades del treball.

Posteriorment s'inicia la càrrega d'imatges i se'ns indica que les feines s'han iniciat i que se'ns avisarà per correu quan s'hagin completat.

En el cas present, no s'ha pogut completar la feina després de nombrosos intents, obtenint un missatge d'error aparentment en el moment de crear les textures. Al ser de funcionament totalment automàtic i opac, no s'ha pogut modificar cap paràmetre en el procés per mirar de corregir l'error i tot i intentar posar-se en contacte amb l'equip responsable per correu electrònic, com s'indica en la pròpia web, no s'ha rebut resposta, per la qual cosa s'ha abandonat en aquest projecte, però es deixa constància de la seva existència i funcionament.

5.1.3. Resultats, comparació i conclusions

A continuació es farà un resum dels resultats obtinguts per a cada mètode i una sèrie de comparacions entre ells.

Posteriorment s'ha realitzat una comparació geomètrica entre els models obtinguts. Per a fer-ho es realitza un càlcul de distàncies entre models, ja que tots estan georeferenciats i la superposició és immediata. Per a això a l'eina CloudCompare s'han comparat els núvols de punts, obtenint-ne com a resultat un valor de diferència (valor absolut de distància) entre els punts més propers, el qual s'ha representat gràficament amb una escala gràfica.

Com a patró de comparació s'han considerat les solucions "tot en u", que en principi haurien de ser més consistents al realitzar-se tot el procés en un sol programa i per tant amb els passos més optimitzats (és a dir Image Master i Photoscan Pro). Després de la comparació entre ells s'ha optat per aquest últim al constatar que el resultat d'Image Master era un pèl irregular.

5.1.3.1. Resultats obtinguts

Del conjunt de tots els processos se n'ha obtingut finalment una model tridimensional format per una malla de triangles amb els seus vèrtexs associats, i una textura també associada.

La mida i resolució mitja d'aquests models s'expressa al quadre següent:

Mètode	Nombre punts núvol	Nombre cares malla	Nombre vèrtexs malla	Resolució mitja malla
Image Master	--	0.8M	1.6M	6 mm
Photoscan Pro	48.5M	10M	4.8M	2-3 mm
Photoscan Std	15M	2.4M	1.2M	8 mm
VisualSFM	6.3M	1.4M	2.7M	4 mm
Regard3D*	2.2M	3.3M	1.6M	6 mm
Arc3D	--	--	--	--

Taula 5-3. Resultats obtinguts

Aquests resultats estan condicionats pels paràmetres utilitzats i els recursos informàtics disponibles. Així, en alguns mètodes s'ha pogut treballar amb valors màxims (Photoscan) i d'altres ni ha estat possible modificar-los (VisualSFM) o l'ordinador no tenia prou recursos per anar més enllà.

Les resolucions que s'han obtingut, de pocs mil·límetres, han estat prou elevades per representar l'escena de manera molt acurada, i permet definir consultes de coordenades o mesures amb precisió.

Alguns valors, inclús, com el càlcul de Photoscan a màxima qualitat, resulten amb elevadíssimes densitats (48 M de punts) que cal valorar si val la pena considerar, ja que porten certs inconvenients, com el temps de processat i un alt volum d'emmagatzematge. Per a fer-ne

la malla s'ha reduït considerablement la densitat, tot i així obtenint una mitja de 2-3 mm de resolució geomètrica, la qual, al capdavant, tampoc queda tan lluny de la de la densitat de malles d'una cinquena part de cares.

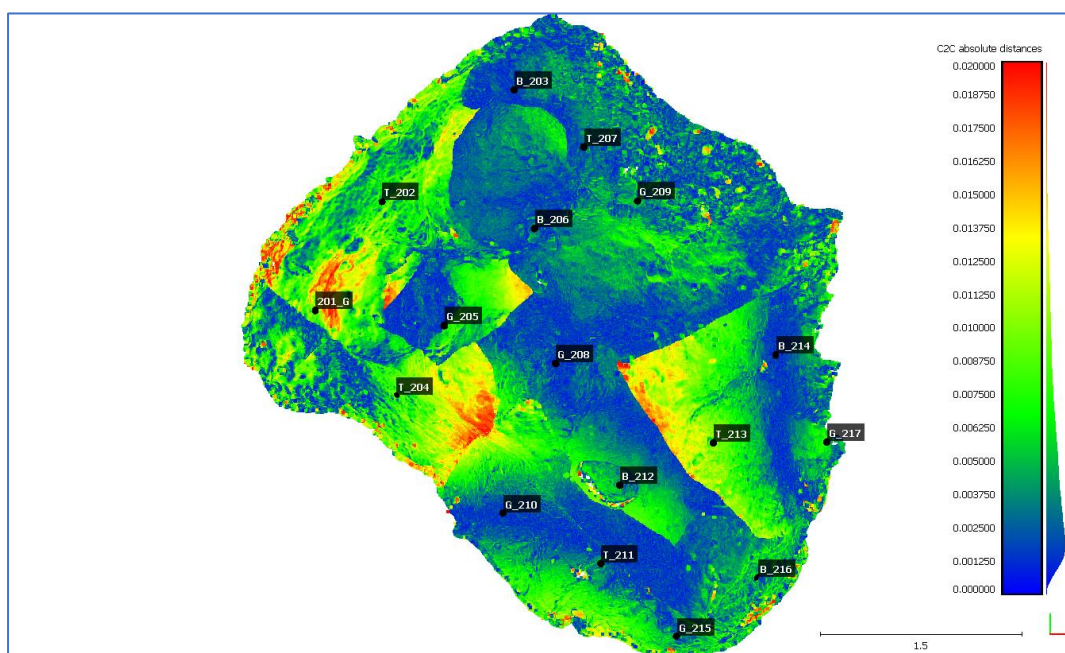
5.1.3.2. Comparació Photoscan Pro – Image Master

La primera comparació realitzada ha estat entre els models de Image Master i Photoscan Pro, ambdós de processat complet (tots els passos s'han realitzat dins els mateixos programes), de firmes comercials, i que presumiblement haurien de ser el que més bon resultat tindrien.

El resultat de la comparació d'ambdós models presenta diferències relativament petites, amb una mitjana al voltant dels 2 mm com s'aprecia a l'histograma (hi ha, doncs, probablement aquest petit desplaçament constant mig entre els dos) però força dispersos, i en zones superiors als 2 cm.

S'observa que aquests errors més grans se situen a l'entorn del punt de recolzament 201, que ha estat eliminat dels processos de georeferenciació al presentar residus elevats, per tant, veient el pegat d'Image Master que depenia d'aquest punt, sembla força clar que si que presentava problemes. Obviant aquesta zona, en la resta es veuen desajustos en les vores de les diferents malles provinents de cada parell de fotografia, com s'havia comentat anteriorment.

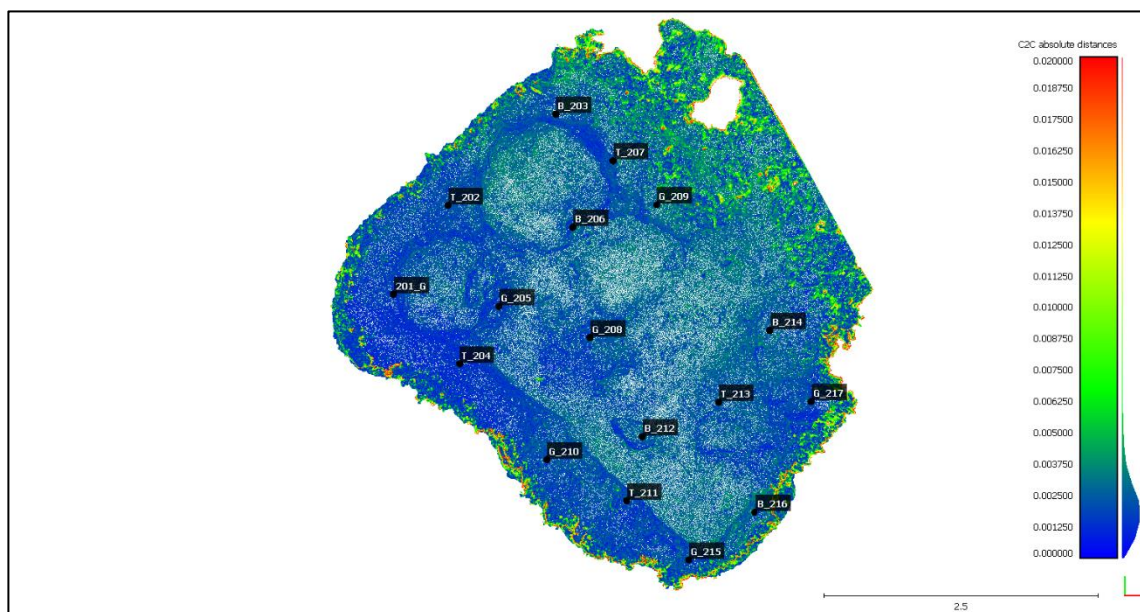
Amb tot plegat, pels requeriments de precisió que en general requereixen les tasques d'arqueologia, es pot dir que el resultat és força bo (la gran majoria de punts estan per sota el centímetre), i en tot cas es pot concloure que el treball amb Image Master demana una especial cura en la planificació, també en la determinació dels punts de control, i en el procés d'orientació externa.



Il·lustració 5-30. Comparació Photoscan Pro – Image Master

Veient en aquest cas la menor consistència del model d'Image Master, es tria com a patró de comparació el model de Photoscan Pro.

5.1.3.3. Comparació Photoscan Pro – Photoscan Standard

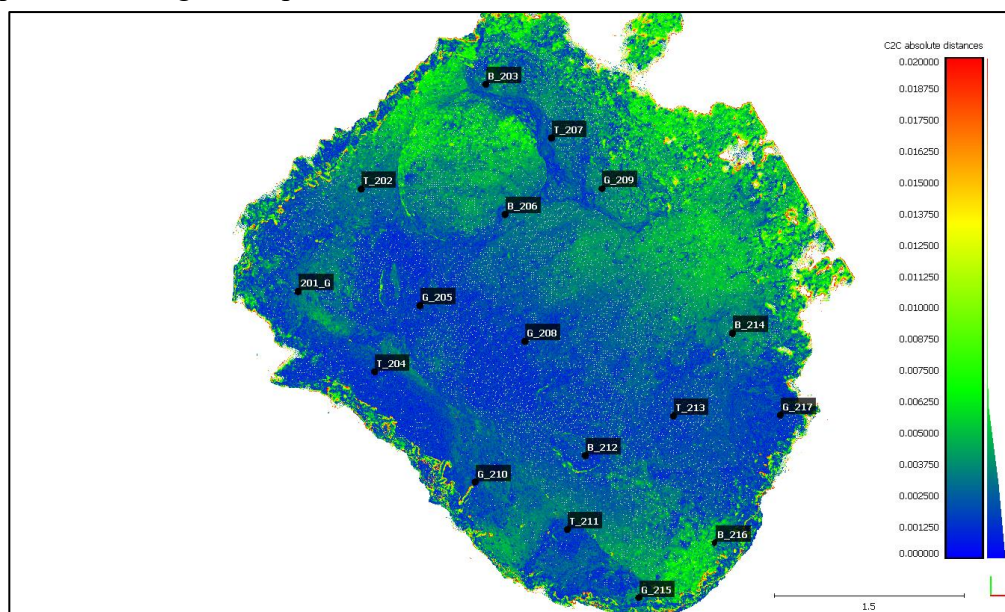


Il·lustració 5-31. Comparació Photoscan Pro – Photosan Standard

En aquesta comparació s’hi veu una molt bona correspondència. El mètode de creació del model ha estat el mateix, de manera que les discrepàncies vindrien del diferent mètode de georeferenciació. Es veu però que la coincidència és molt alta, amb una petita desviació sistemàtica d’uns 2 mm i una dispersió d’un parell més. Es mostra, doncs, una bona coherència en els mètodes de georeferenciació i un resultat pràcticament equivalent.

5.1.3.4. Comparació Photoscan Pro – VisualSFM:

El model de VisualSFM s’obté després de passar per tres programes (VisualSFM, Meshlab i CloudCompare), i per tant es podria pensar que la qualitat del model es podria veure compromesa en algun d’aquests canvis.



Il·lustració 5-32. Comparació Photoscan Pro - VisualSFM

La comparació, però, indica que el resultat que s’obté és geomètricament quasibé equivalent, amb divergències mínimes que pràcticament mai arriben al centímetre si no és en

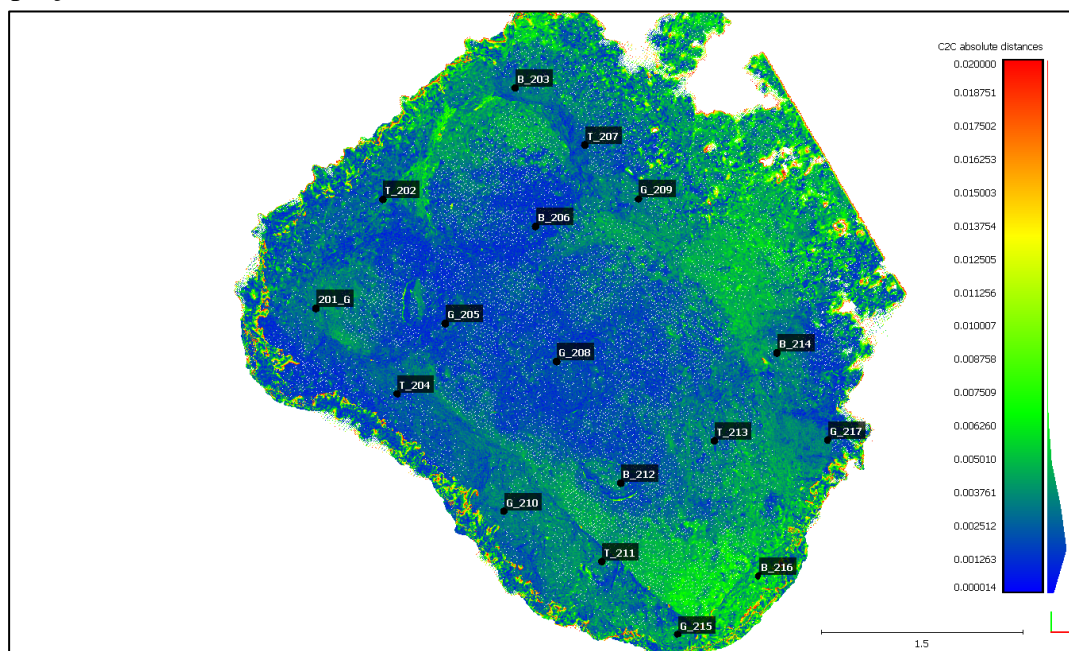
les zones més externes, i amb el conjunt d'errors centrat al 0 (és a dir sense desplaçaments entre ells), i amb una dispersió que arriba a l'entorn dels 6 mm.

Es mostra doncs una molt bona consistència entre els resultats d'ambdós processos.

5.1.3.5. Photoscan Pro – Regard3D

El procés amb Regard3D passa per un segon programa (CloudCompare) per a la georeferenciació.

La comparació geomètrica dels dos models mostra en l'histograma una menor dispersió (a l'entorn dels ± 2 mm), i també un petit desplaçament sistemàtic de 2 mm de mitja de desplaçament entre models.



Il·lustració 5-33. Comparació Photoscan Pro – Regard3D

Podem considerar també que l'ajust és molt bo, mostrant una bona consistència entre els dos models.

5.1.3.6. Conclusions zona de sitges

De les vies avaluades, totes han aconseguit arribar a l'objectiu d'obtenir una representació tridimensional de l'escena estudiada, formada per una superfície de malla triangular amb textura fotorealista superposada

La comparació de resultats mostra certa disparitat en la quantitat d'informació que s'ha extret de les mateixes imatges (Taula 5-3), amb variacions considerables de les densitats de núvols de punts (de 2 a 48 M punts) o cares de triangulació (de 10 a 0.8 M). En els processos hi participen, sovint, gran nombre de paràmetres que condicionen notablement els resultats finals. A més, els diferents algorismes de càlcul tenen també diferents requeriments de recursos informàtics i algun cop els ordinadors han quedat bloquejats. Per tot plegat ha estat difícil trobar un cert equilibri entre màxima qualitat sense sobrepassar els límits de les eines de les que disposàvem. De totes maneres, en tots els casos s'han assolit valors de densitat al voltant del 5 mm com a mínim, valor suficient per la majoria d'aplicacions de documentació, per bé que s'ha mostrat que densitats més elevades són possibles (a canvi de llargs processos de càlcul i recursos informàtics).

Pel que fa a la geometria, tots els mètodes s'han mostrat consistents, obtenint resultats molt similars tots ells, amb variacions en general mínimes. En cap cas s'ha trobat deformacions del model per una deficient orientació de càmeres, i si s'ha trobat alguna diferència més evident s'ha explicat més per la qualitat d'algun punt de control i no pel mètode d'obtenció del model.

En definitiva s'ha mostrat, més enllà d'avaluacions més concretes de qualitat o precisió, que qualsevol via per a l'obtenció del model 3D de les que s'han avaluat és prou sòlida per obtenir resultats molt acceptables. La consistència entre tots ells ha estat molt elevada.

Resumint:

- De tots els sistemes se n'ha aconseguit un resultat.
- Tots els resultats són d'alta consistència entre ells.
- La quantitat d'informació que se n'ha obtingut varia en funció de paràmetres / recursos informàtics necessaris...
- ... però tots els models obtinguts són utilitzables (resolució mínima ~5 mm).
- Qualsevol dels sistemes és susceptible de ser utilitzat en feines de documentació.

5.2. INTERIOR COVA

A més de les proves a la zona de sitges, part principal d'aquest treball, s'ha pogut fer una segona part a la part interior del jaciment. La disponibilitat de dos aparells de captura per mesures làser per prendre dades de la cova complerta va propiciar també d'intentar modelar la cova mitjançant imatges, i intentar igualment georeferenciar aquest model, forçant considerablement, com es veurà, les condicions idònies que s'havien trobat a l'exterior.

5.2.1. Mesures làser

Es va disposar d'una estació total híbrida Topcon IS, amb funcions d'escaneig, i davant l'interès de l'equip arqueològic de tenir un model 3D general de la cova per motius divulgatius es va intentar veure si era possible realitzar-ne la presa de dades amb aquest aparell. Els jaciments utilitzen habitualment estacions totals per a la presa de dades i dibuix de planimetries, alçats, així que tenir un aparell que realitzi a més petites funcions d'escaneig pot ser també una solució interessant a tenir en compte.

També es va aprofitar la disponibilitat d'un aparell làser escàner (cortesia de Jordi Martínez) per fer un aixecament de la cavitat.

5.2.1.1. Estació Híbrida + Image Master

L'ús d'estacions topogràfiques en jaciments arqueològics és molt habitual i està ben assentat. L'estació híbrida cobreix aquestes tasques de manera habitual, i a més té la funció afegida de poder fer petits escanejos, de manera que aquesta condició de doble funció pot fer-lo interessant en el seu ús en jaciment, donant més flexibilitat a les tasques de documentació.

Per a la presa de dades amb l'estació es procedeix de manera habitual, amb l'estacionament i orientació. Si aquest es realitza en una estació de referència amb coordenades conegudes el núvol de punt ja estarà orientat. Aquesta és una de les més grans avantatges que té, ja que simplifica molt el processat, que en aquest cas només seria importar i crear. Si aquests es fan en s'hi van haver de dedicar diverses jornades, ja que la velocitat d'adquisició de dades, com s'ha comentat, és molt baixa, d'uns 20pts/s màxim.

Es van fer preses amb diferents característiques, de 360° per al sostre o de zones determinades per límits poligonals per les parets i terres.

El procés per a l'escanejat conté els següents passos:

Estacionament i orientació.

Per a la presa de dades amb l'estació es procedeix de manera habitual, amb l'estacionament i orientació. Si aquest es realitza en una estació de referència amb coordenades conegudes el núvol de punt ja estarà orientat al descarregar-lo. Aquesta és una de les més grans avantatges que té, ja que simplifica molt el processat, que en aquest cas només seria importar i crear la malla triangular.

Escanejat

Entre els menús de presa de dades habitual, hi ha l'opció d'escanejar. Es demana aleshores l'àrea i la densitat mínima. Per a això cal tenir en compte la distància màxima a la que es mesurarà, i determinarà la separació entre passades, ja que en el moviment transversal sempre escaneja de manera contínua. En aquest cas es va programar una densitat mínima de 5 cm..

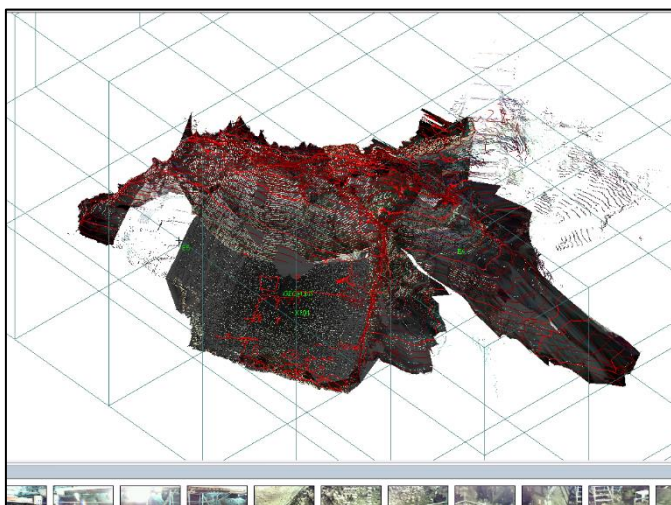
Un cop determinada l'àrea i metodologia (360°, determinat amb dos angles verticals o parcials, delimitat amb una polilínea) i si es vol dades d'imatge, l'aparell inicia primer la presa de fotografies i posteriorment comença les escombrades de mesures.

Per a fer l'interior de la cova es va necessitar diferents jornades, ja que la velocitat d'escaneig és molt molt baixa (20pts/s), allunyadíssima dels aparells especialitzats de làser-escàner.

En total es van fer escanejats en quatre jornades (parcials), durant els quals es van prendre 13 escanejats, amb uns 630000 punts, en aquest cas amb separacions de 0.5-5 cm.

Processat

Com que es va treballar amb l'aparell estacionat i orientat, la feina de processat quasi es va limitar a la importació i creació de la malla triangular. Cal dir que el modelat de la malla es realitza tenint en compte el punt de visualització del núvol de punts en pantalla, és a dir que cal que no hi hagi oclusions, ja que en cas contrari interpretarà com a adjacents punts que en realitat no estan propers en l'espai, unint-los en triangles erronis. Això fa que els models amb "cavitats", com és el cas tractat aquí, calgui dividir-los en punts de vista sense oclusions, formant així diferents fragments que cal després refinar i unir manualment, la qual cosa representa una tasca feixuga. En el cas de la cova va resultar ser gairebé una feina impracticable, ja que sempre hi havia una cavitat o racó amb solapament que generava desenes de triangles erronis. A més el programa no té ben optimitzades les eines d'edició de triangles.



Il·lustració 5-34. Image Master: composició d'escanejats amb IS i exemple d'imatge extreta de la càmera de l'estació.

Finalment es va deixar en un núvol de punts conjunt per a tota la cova. Als punts se'ls pot assignar el color extret de les imatges (les càmeres també estan ja automàticament calibrades tant interna com externament). Les imatges, però deixen molt a desitjar, amb molt poca resolució, poc color funcionament automàtic poc acurat.

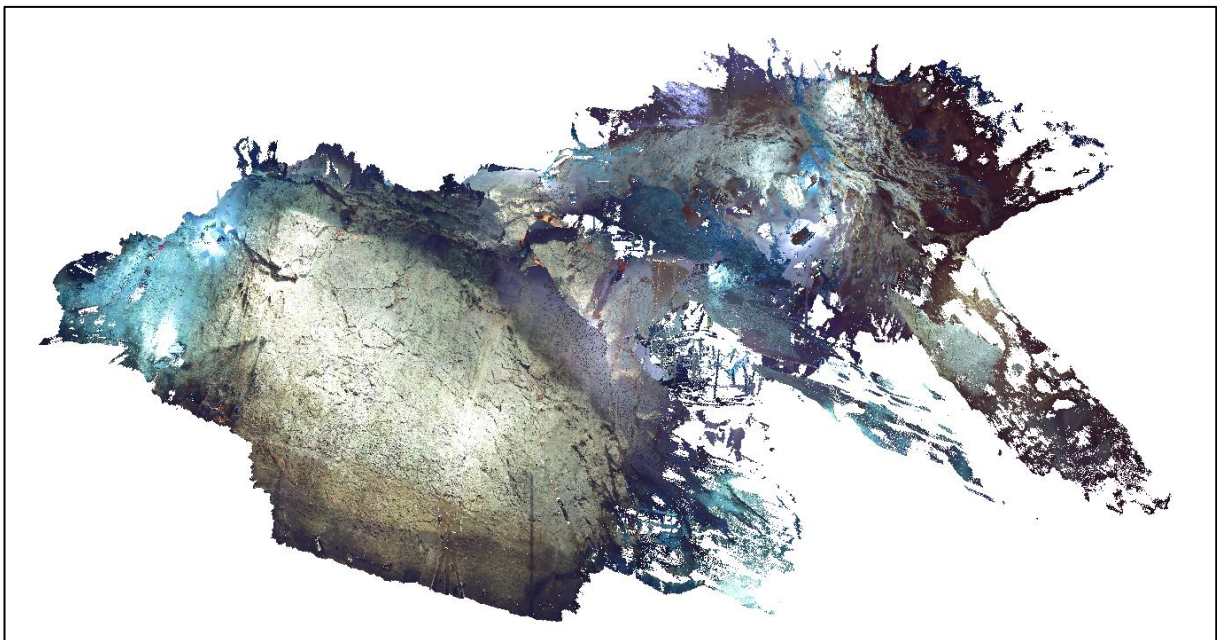
5.2.1.2. Escàner Làser Faro

Durant la realització del treball al jaciment es va dur també a terme un escanejat de l'interior de la cova amb un escàner làser Faro.



Il·lustració 5-35. Escàner làser Faro i diana de referència a l'interior de la cova.

L'aparell té un funcionament en camp força senzill, en el qual, tenint en compte que es van realitzar escanejats de 360°, pràcticament només calia determinar la densitat desitjada per a una distància representativa per aquell estacionament.



Il·lustració 5-36. Núvol de punts de l'escàner làser.

Aquest escaneig es va realitzar en tres estacionament, dels quals un no va reeixir degut a vibracions per unes obres que es feien d'adequació de l'accés a la cavitat. Els altres dos estacionaments es van referenciar mitjançant dianes, a les quals se'ls va donar coordenades des de les bases que hi ha a l'interior de la cova (les mateixes que es van utilitzar per als escanejos de la IS).

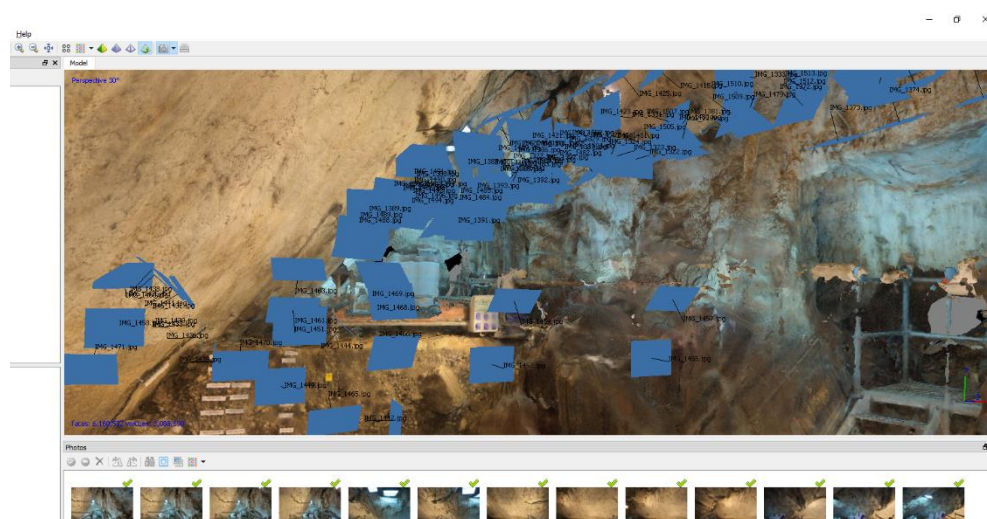
Es va poder disposar del resultat d'aquell escaneig, en forma de núvol de punts georeferenciat i amb una densitat d'1 cm, en format .asc, i informació de reflectivitat i color per a cada punt.

Aquest núvol servirà per a fer una comparació geomètrica també de les dades preses amb la IS.

5.2.2. Captura d'imatges

De la cova també se'n va fer una presa d'imatges, per veure si se'n podia treure un model tridimensional, però es va fer pensant més en aplicacions divulgatives, ja que es tenien les dades dels escàners per els models geomètrics.

De tota manera, durant la realització del treball es van rescatar les imatges per intentar fer-ne també el model tridimensional referenciat, i veure així fins a quin punt responien els programes SFM (es va descartar processar-les amb Image Master per raons pràctiques).



Il·lustració 5-37. Photoscan Standard, interior model cova, s'observa la interrupció de la passarel·la per efecte de les màscares en les fotografies..

5.2.2.1. Càmera i presa d'imatges

En aquest cas la captura d'imatges es va fer amb la mateixa càmera (Canon 30D), però utilitzant un objectiu zoom angular Canon 10-22 mm en la seva focal mínima, degut a les curtes distàncies i la magnitud de l'escena a representar. També es van prendre en passades d'alt solapament, aprofitant les bastides presents i intentant cobrir tota l'àrea.

Resolució (px)	Focal (mm)	Obertura F	Velocitat (s)	ISO
3504 x 2336 (8 Mpx)	10	3.5	1/20 – 1/40	200

Taula 5-4. Cova: característiques de les imatges.

Distància focal	10 mm
Dist. màx. càmera objecte	5 m
Escala fotografia E	500
Mida del píxel del sensor	0.0062 mm
Petjada de píxel sobre terreny	3.1 mm

Taula 5-5. Cova: mida màxima de píxel sobre terreny.

L'interior de la cova presenta reptes complicats per a la presa d'imatges, primerament per la il·luminació molt irregular, amb zones molt fosques i zones, prop dels punts de llum, molt il·luminades, amb risc d'obtenir àrees cremades o massa fosques, és a dir sense informació. A més hi havia punts de llums amb dues temperatures de llum diferents (càlida i freda), a part de l'entrada de llum natural de l'accés a la cova, el que feia inevitable una deficiente informació del color.

Per mantenir unes velocitats d'obturació relativament baixes i evitar fotografies mogudes tot i l'ajuda que representa l'ús de curtes focals, es va elevar a 200 el valor ISO, aconseguint valors de 1/25 – 1/40. En total es van utilitzar 151 imatges.

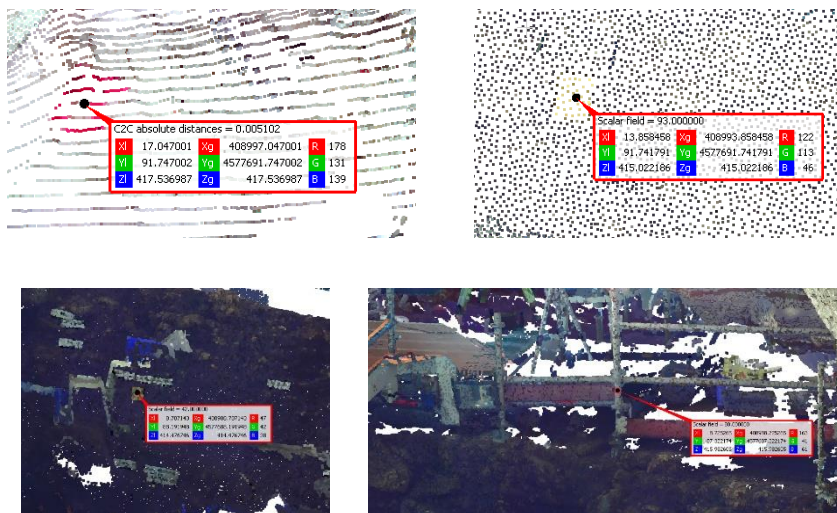
La mida del píxel sobre el terreny màxim (tenint en compte distàncies d'uns 5 m) és d'uns 3 mm. Evidentment, tenint en compte les característiques del lloc i la gran quantitat d'imatges preses

Les imatges es van processar amb Photoscan (Standard), VisualSFM i Regard3D. Dels tres, però només el primer va poder obtenir-ne un model força complet.

5.2.2.2. Punts de referència

Durant la presa d'imatges no es van situar punts de referència ja que no es pretenia en principi fer un model referenciat. Quan a posteriori s'ha intentat realitzar-lo s'ha mirat d'utilitzar les dades de les què es disposava (els núvols de punts en coordenades) per mirar d'extreure'n informació

Per això s'ha d'identificat als núvols de FARO o de la IS punts identificables també al model de Photoscan, per assignar-los coordenades (un parell de dianes en les parets d'excavació, un punt d'orientació per tasques topogràfiques del jaciment, i un adhesiu d'una bastida.

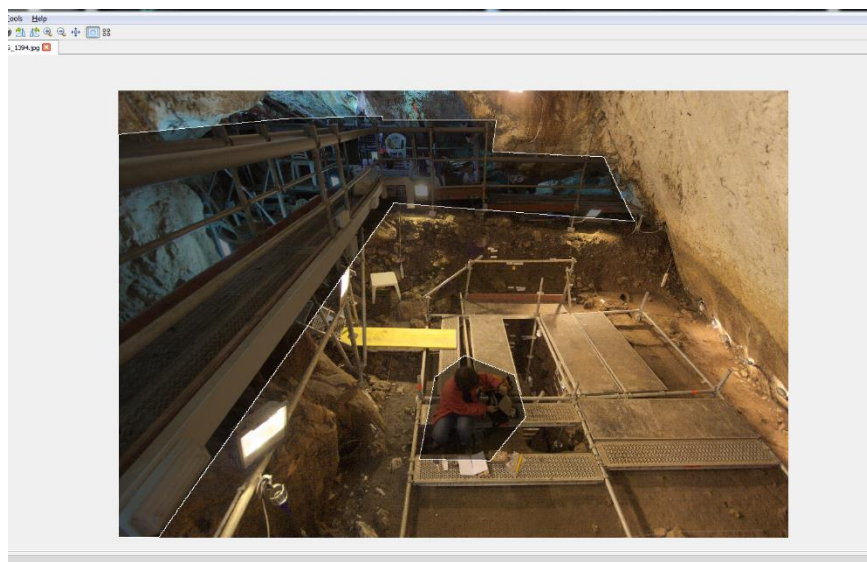


Il·lustració 5-38. Coordenades de punts extrems dels núvols d'escaneig per utilitzar de recolzament.

5.2.3. Processat de dades

5.2.3.1. Photoscan Standard

Pel processat es van triar 151 fotografies, realitzades dins de la cova, des de les passarel·les i bastides, i intentant abarcar tots els racons.

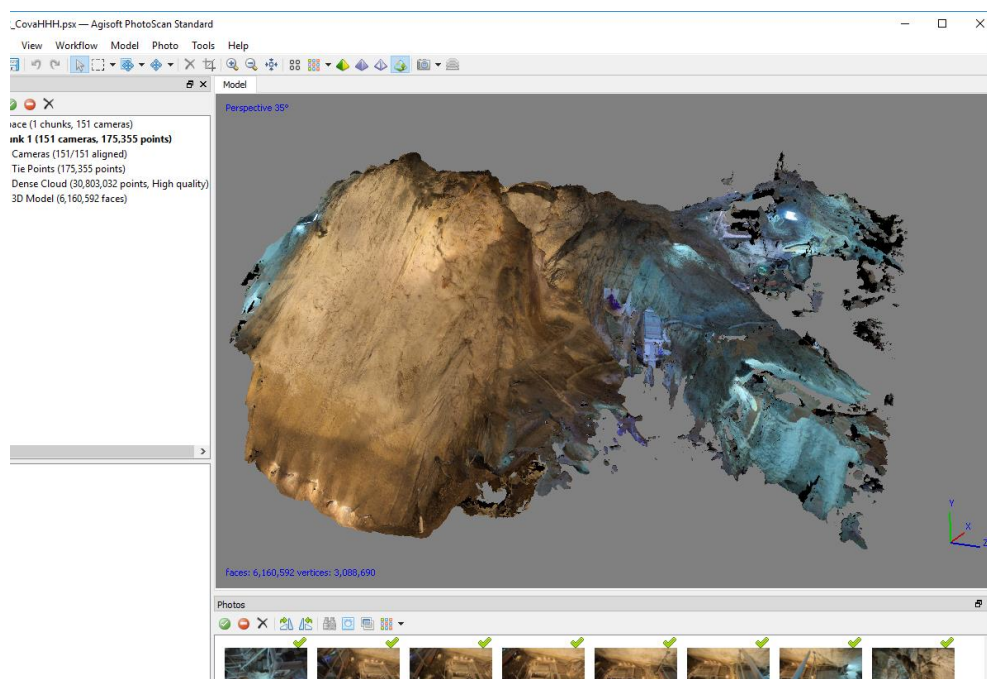


Il·lustració 5-39. Màscara aplicada a bastida i personal.

Abans de processar es va intentar eliminar, mitjançant màscares, la passarel·la que “sobrevola” la sala principal i altres elements

El procés ha estat el mateix que el descrit a la zona de sitges, sense trobar-hi dificultats especials.

Amb els punts extrets dels núvols de punts dels aparells làser, finalment s’ha pogut fer una transformació a CloudCompare, amb el mateix procediment que a les sitges, amb uns

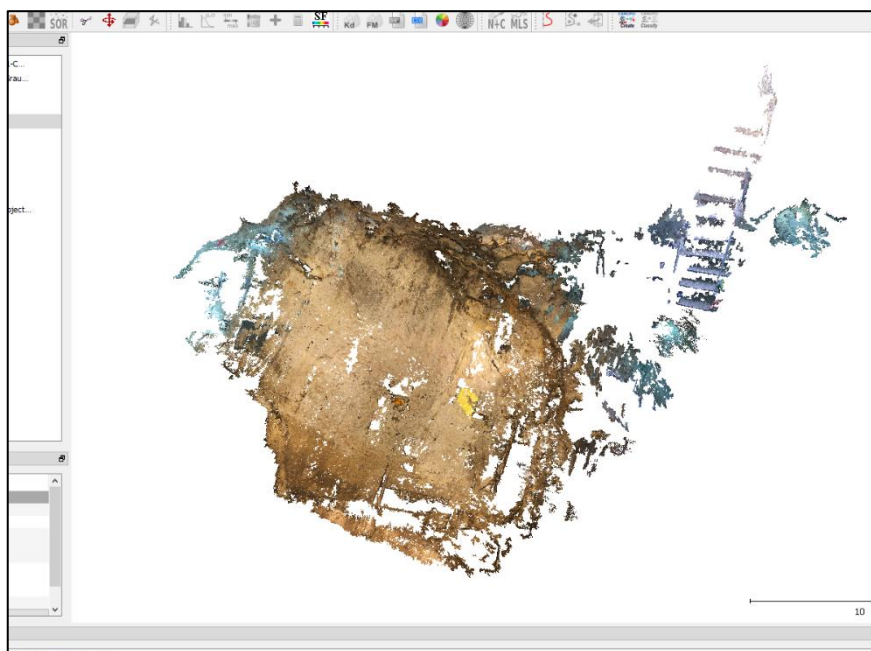


Il·lustració 5-40. Photoscan Standard: model tridimensional de la cova.

residus sorprenentment baixos (RMS de 5 mm). Així s'ha afegit aquest model per a realitzar les comparacions.

5.2.3.2. VisualSFM

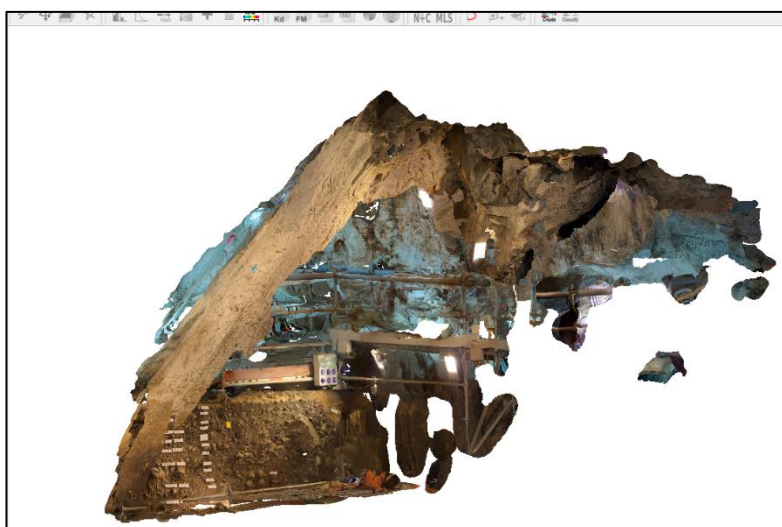
Amb VisualSFM es va obtenir un model bastant deficient. Moltes càmeres no es van poder alinear, de manera que en va resultar un núvol de punts molt incomplert, i bastant inviable de treure'n una superfície o identificar-ne punts per referenciar, i va ser descartat.



Il·lustració 5-41. Visual SFM, model de l'interior de la cova, molt incomplert.

5.2.3.3. Regard3D

Amb Regard3D es va intentar fer el mateix que amb Photoscan, però el programa no va ser capaç d'alinear totes les càmeres, resultant en zones amb grans forats i incomplertes.



Il·lustració 5-42. Regard3D, model de la cova, incomplert.

Bàsicament només es va modelitzar el fons de la cova, l'altra meitat de la sala i zona d'entrada van quedar incompletes. A més, la georeferenciació que es va intentar, amb alguns dels mateixos punts de Photoscan va donar valors de residus més grans (al voltant de 5 cm) i finalment es va descartar.

5.2.4. Comparació i conclusions

De la part interior del jaciment tenim, doncs, les dades de l'escaneig de l'escàner làser FARO, les de l'estació híbrida Topcon IS, i el model reconstruït de Photoscan Standard. Els tres models referenciats al sistema de coordenades del jaciment. Dels dos primers en teníem un núvol de punts, mentre que del tercer se n'ha realitzat tot el procés fins a obtenir també una malla amb textura.

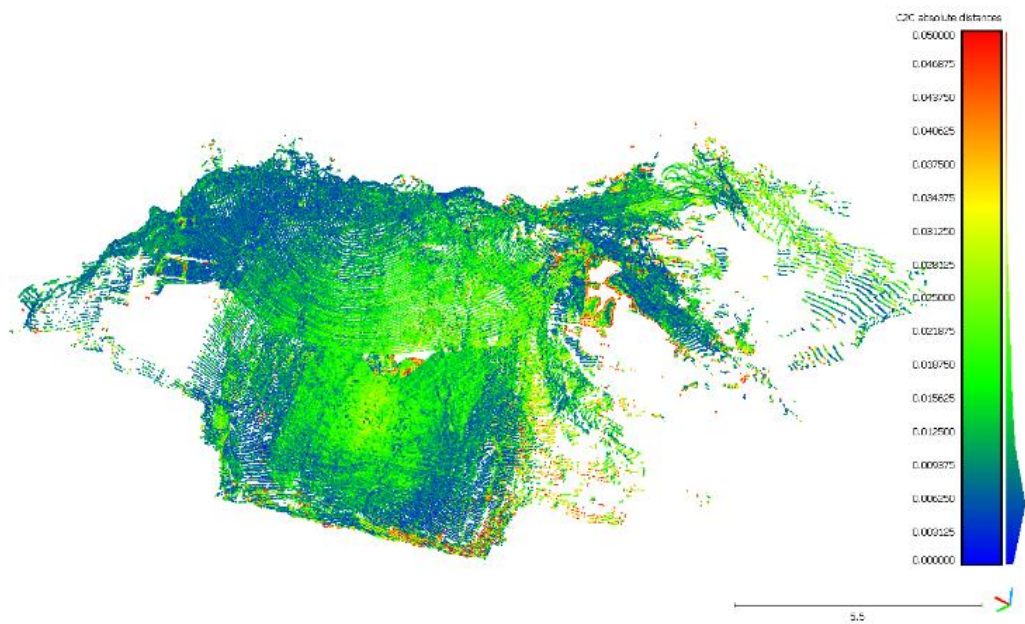
Característiques dels models finals:

	Cares malla	Punts del núvol	Resolució mitjana
FARO	--	2.8M	1 cm
IS	--	0.6M	5 cm
Photoscan Std	6.1M	3.0M	1 cm

Taula 5-6. Cova: característiques dels models obtinguts

Com en el cas de les sitges, s'ha realitzat una comparació per diferències entre núvols de punts amb CloudCompare, prenent com a referència el núvol de làser escàner.

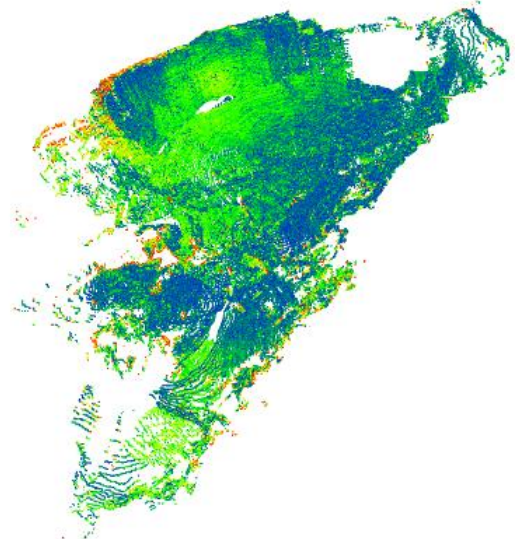
5.2.4.1. Comparació escàner làser - estació híbrida



Il·lustració 5-43. Cova, comparació escàner làser - estació híbrida, vista obliqua.

En la comparació de la superposició dels dos núvols, el del escàner làser (Faro) i l'estació híbrida (IS), s'observa que la divergència màxima està al voltant del 6 mm, amb una dispersió que arriba fins als 2 cm. S'observa clarament una gran zona amb aquestes diferències (en verd) corresponents a la paret llisa de la gran sala, corresponent a un dels escanejats de la IS, la qual cosa pot fer suposar en algun error en aquell estacionament.

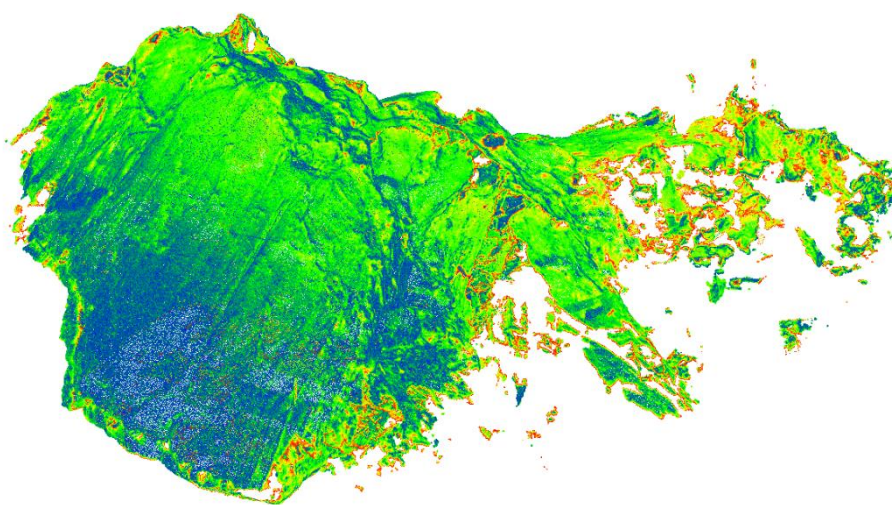
Per la resta s'observen algunes zones d'encara més divergències a la vora del model (en vermell), però que poden correspondre a mesures incorrectes (error de rebot de senyal...) o zones sense solapament entre els dos núvols. El model de la IS està fet en fragments, corresponents als diferents estacionament, i tornem a trobar el que havíem observat a les sitges, tot i que els talls aquí queden més diluïts, pel solapament entre ells. De tota manera, per tractar-se d'un model general, divergències de 2 cm no són greus en, tenint en compte que estem parlant de densitats de 2 / 5 cm pels dos núvols.



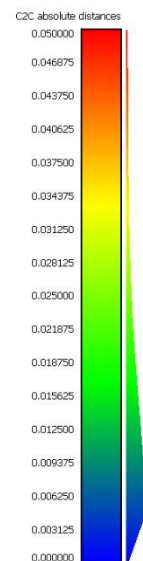
Il·lustració 5-44. Cova, comparació escàner làser - estació híbrida, vista zenital.

5.2.4.2. Comparació escàner làser – Photoscan

En la comparació entre el núvol de punts escàner làser i el procés SFM de Photoscan Standard s'hi veu la mateixa divergència mitja al voltant dels 6 mm, però en aquesta comparació la dispersió és més gran i s'hi veuen més zones al voltant dels 2 – 3 cm, sobretot a la zona de sostres i entrada (les zones vermelles que s'entreveuen dins la cova es corresponen a l'eliminació de la bastida per l'ús de màscares, o a la modificació de la disposició d'aquestes entre l'escanejat i la presa de les imatges).



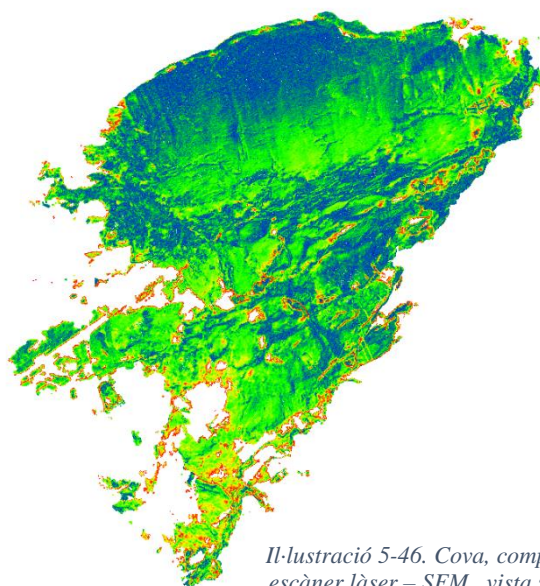
Il·lustració 5-45. Cova, comparació escàner làser - SFM, vista obliqua.



Tot i aquestes majors divergències, no és un mal resultat tenint en compte les dificultats per arribar a l'elaboració del model SFM. Si la zona de sitges suposaven unes condicions força ideals, en aquest cas s'han vist forçades en diversos aspectes:

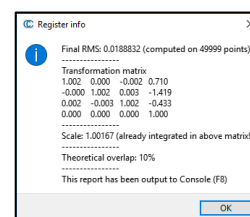
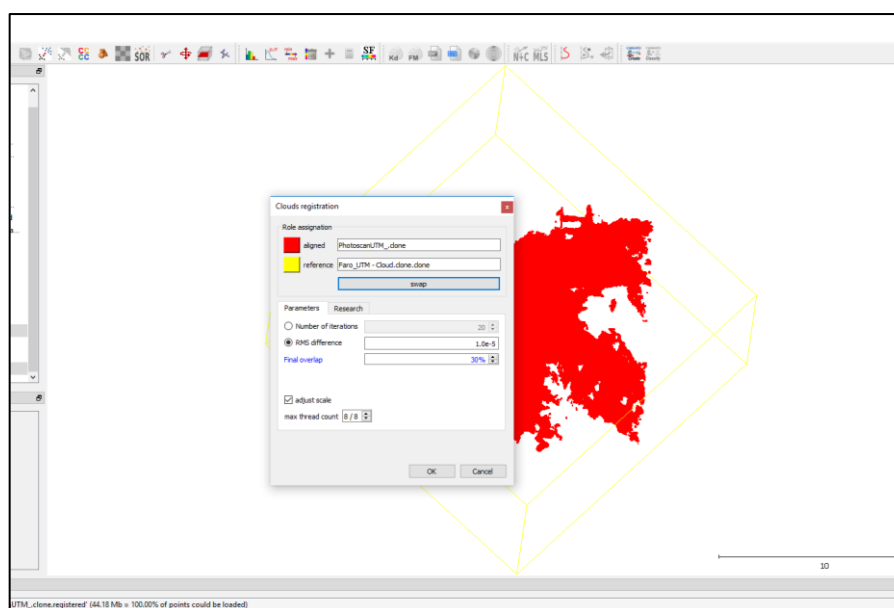
- Condicions d'il·luminació molt difícils.
- Zones de difícil visibilitat.
- Absència de punts de recolzament, transformació amb pocs punts i mala distribució.

Conscients d'aquestes dificultats, s'ha intentat veure fins on es podria arribar, i com demostra que no tots els programes han aconseguit resoldre l'escena, el resultat cal considerar-lo notable, i perfectament usable en aplicacions concretes com a model general.

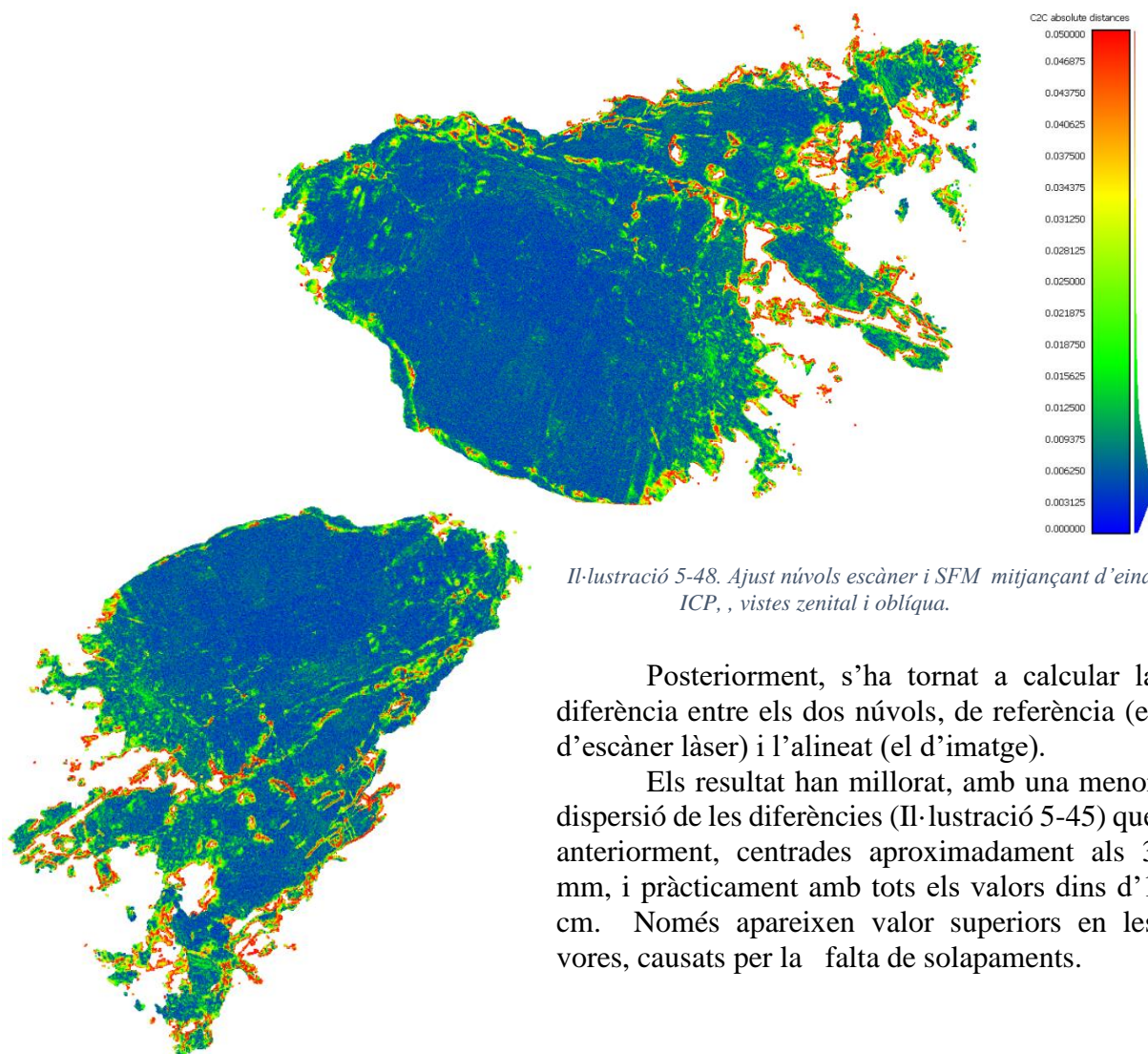


Il·lustració 5-46. Cova, comparació escàner làser – SFM, vista zenital.

De totes maneres, vistes aquestes diferències, s'ha intentat acabar d'afinar l'ajust entre els dos núvols, prenent el de l'escàner làser com a referència. A Cloud Compare s'ha utilitzat l'eina *Fine registration (ICP)*, que intenta ajustar dos núvols, prenent-ne un de referència, sempre que representin el mateix element i que estiguin prèviament ajustats aproximadament.



Il·lustració 5-47. Eina Fine Registration (ICP) aplicada als núvols d'escàner (referència) i d'imatge (a alinear) i resultat de la transformació..



Il·lustració 5-48. Ajust núvols escàner i SFM mitjançant d'eina ICP, , vistes zenital i oblíqua.

Posteriorment, s'ha tornat a calcular la diferència entre els dos núvols, de referència (el d'escàner làser) i l'alineat (el d'imatge).

Els resultat han millorat, amb una menor dispersió de les diferències (Il·lustració 5-45) que anteriorment, centrades aproximadament als 3 mm, i pràcticament amb tots els valors dins d'1 cm. Només apareixen valor superiors en les vores, causats per la falta de solapaments.

5.2.4.3. Conclusions interior cova

En resum, els tres mètodes han obtingut un altre cop resultats bastant similars. Finalment, el model obtingut amb imatge ha obtingut bons resultats geomètrics generals, tot i haver-ne forçat l'obtenció amb imatges de difícil il·luminació que compliquen el processat dels algorismes de detecció de característiques comuns (condicions que han fet fallar dos altres intents), i una georeferenciació també complicada a partir de punts poc fiables. El bon ajust final que s'ha aconseguit amb l'escanejat demostra que el model obtingut té una bona precisió relativa, no observant-s'hi deformacions considerables al comparar-lo amb l'altre.

Així mateix, el model de l'estació híbrida, tot i treballar en el mateix sistema de coordenades, té divergències més grans amb el model d'escàner. Sembla lògic pensar que aquests (petits) problemes d'ajust venen de l'estació, al tenir una presa de dades més irregular, amb nombrosos estacionaments que poden fer que la consistència de les dades sigui menys acurada. A més, la càmera encarregada de la presa d'imatges no té un rendiment massa satisfactori, de manera que si es requereix aplicar textura fotogràfica al model cal considerar una presa d'imatges a part.

6. CONCLUSIONS

L'ús de les tècniques de fotogrametria i escàner làser per a l'obtenció de models tridimensionals de la realitat no és un tema nou, com tampoc la seva aplicació en la documentació arqueològica. El present treball pretenia realitzar un petit inventari d'eines accessibles per a poder aplicar-les en un ús generalitzat i sistemàtic. En aquesta mostra s'han utilitzat eines variades, incloent-ne algunes de tall més comercial i altres de l'àmbit de la recerca per a la seva consideració i valoració a l'hora de poder triar la metodologia que més s'adeqüi a cada necessitat.

Dins d'aquesta mostra s'ha realitzat una doble prova en condicions reals en el jaciment de Can Sadurní, a Begues, per veure com es comportaven i quines limitacions o avantatges tenen cada un.

La prova ha pretès realitzar una comprovació interna de la solidesa en el seu processat i resultats finals. Aquesta s'ha realitzat amb un mateix conjunt de dades d'entrada i amb la generació del mateix tipus de resultat (creant vies de treball on els programes provat no arribaven) per poder fer-ne una comparació en igualtat de condicions i veure si els models finals dels diferents sistemes eren coherents entre ells o apareixien alguns resultats de qualitat variable.

Zona de sitges:

En la primera part s'ha avaluat cinc sistemes per a la creació de models tridimensionals digitals a partir d'imatge prenent com a mostra l'estat final d'excavació d'un conjunt de tres sitges a la zona exterior del jaciment. En les proves realitzades i resultats obtinguts es veu que qualsevol dels sistemes és utilitzable i aconsegueix resultats satisfactoris i força equivalents. Els sistemes, de diferents característiques i funcionaments han mostrat que la possibilitat de crear models 3D pot ser avui en dia molt assequible.

De la primera part de l'avaluació d'eines es pot resumir:

- **Image master** és una eina potent, però ja força antiquada (porta molts anys en el mercat). Això es tradueix en certs desavantatges, com és un flux de treball poc intuïtiu, eines d'edició molt farragoses, i relativament poca automatització de certs processos, com el d'orientació externa o la creació del model per parells de fotografies, resultant aquest en un amalgama de pegats que exigeixen més tractament. A més requereix la calibració interna de la càmera, que si bé és un procediment senzill, lliga la presa d'imatges a l'ús d'una càmera determinada. És una eina potent i perfectament vàlida, però d'elevat preu.
- **Photoscan** sembla l'eina més avançada, en constant desenvolupament (s'ha actualitzat diverses vegades durant la realització del treball) i amb un procés molt refinat i intuïtiu en general. De les dues versions, la Pro té un cost força considerable, mentre que la Standard resulta prou assequible per la feina que s'hi pot fer, trobant a faltar, en aquest cas, només la georeferenciació. És cert, però, que l'ús de punts de control pot aportar també rigidesa en el càlcul en certs escenaris (models lineals com murs) a part de servir per referenciar el model.
- **VisualSFM** és una eina senzilla d'utilitzar, però amb poca flexibilitat (si el procés d'alineació falla, no hi ha paràmetres fàcilment editables per intentar corregir-lo), la qual cosa demana més esforç en una bona presa de dades. A més és el que necessita més passos complementaris per finalitzar el procés (si bé s'en facilita l'exportació i la transició és senzilla).

- **Regard3D** ha estat una agradable troballa: és un programa que realitza quasi tots els passos, excepte la georeferenciació, i és força intuïtiu d'utilitzar en el flux de treball general, per bé que la manipulació dels paràmetres pot ser una mica aclaparador. Tot i així aquests estan força ben documentats a la web, i en la majoria es dona recomanacions de com utilitzar-los. El panell lateral amb l'arbre dels diferents processos que es poden anar bifurcant de manera clara és un bon recurs per anar afinant els valor de paràmetres fins obtenir un resultat satisfactori.
- **Meshlab i CloudCompare** només s'han utilitzat per realitzar-hi tasques concretes, i han complert perfectament. Són bones eines de l'àmbit del programari obert, amb molt suport, desenvolupament actiu i documentació pròpia i de la comunitat d'usuaris, amb molt potencial d'utilització per a passos posteriors a l'elaboració del model.

Cova:

Pel que fa a les eines de captura activa (l'escàner làser i l'estació híbrida) han funcionat de maneres diverses:

- De l'**escàner làser** se n'ha obtingut un núvol molt regular i el més complet i es va obtenir de manera notablement ràpida en camp, però precisa de dispositius i programari especialitzat.
- Per altra banda, l'**estació total híbrida** es notava que no estava optimitzada per aquesta feina. La lenta velocitat d'escombrada i la deficient qualitat d'imatge i, altre cop, el poc optimitzat programa de processat van fer-ne una feina feixuga i poc satisfactòria. Però per altra banda es tracta també d'un aparell de topografia clàssic, d'ús habitual durant les campanyes d'excavació, amb l'afegit de poder fer algunes escanejades puntuals, la qual cosa el fa força interessant.
- La modelització de l'interior de la cova a partir d'**imatges** ha estat una tasca més exigent, i aquí sí que no tots els sistemes han tingut èxit, tot i que els resultats que sí que s'han pogut obtenir han estat bons comparats amb els altres. Les condicions, de tota manera eren certament difícils, per bé que amb la planificació i la utilització d'un enllumenat més adient segur que es podrien haver obtingut millors resultats.

En definitiva, no s'ha pretès fer una avaluació a fons dels diferents sistemes sinó només esbrinar si podien ser eines vàlides i donar-les a conèixer. La tria d'un o altre per a integrar-lo en els processos de documentació del jaciment s'hauria de realitzar segons els condicionants d'aquests (característiques, recursos disponibles...) i amb la realització de proves més intensives i concretes amb tots ells. Tots els programes utilitzats són de lliure descàrrega o tenen versions de demostració, per la qual cosa és possible fer avaluacions en condicions més concretes.

S'ha mostrat, doncs, que l'obtenció de models digitals fotorealistes i georeferenciats és un recurs valuós que pot aportar gran informació en l'àmbit de la documentació de l'excavació arqueològica, i s'ha mostrat també que actualment hi ha solucions vàlides molt accessibles per dur-ho a terme de manera integrada i sistemàtica en els processos d'excavació, especialment entre els mètodes basats en imatge, ja que utilitza dispositius i eines d'ús ja habitual en un jaciment (càmera fotogràfica convencional i suport topogràfic), formats de dades també habituals i programari assequible.

Per últim cal tenir en compte també les possibilitats més enllà de la documentació, sobretot en l'àmbit de l'educació i divulgació, així com en el de la recerca.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Col·lectiu per a la Investigació de la Prehistòria i l'Arqueologia del Garraf-Ordal. Col·lectiu per a la Investigació de la Prehistòria i l'Arqueologia del Garraf-Ordal CIPAG. A: [en línia]. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: <http://cipag.beguesentitats.cat/>.
2. Lowe, D.G. Method and apparatus for identifying scale invariant features in an image [en línia]. 6 març 2004. DOI 10.1016/j.(73). [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: <https://patents.google.com/patent/US6711293B1/en>.
3. Cruz, I. i Ortega, N. Integración en el discurso estratigráfico actual de los materiales prehistóricos, procedentes de excavaciones antiguas de la cueva de Can Sadurní, ubicados en la Biblioteca-Museo Víctor Balaguer de Vilanova i la Geltrú. A: M. Edo, A. Blasco i M. Villalba, ed., *La cova de Can Sadurní i la Prehistòria de Garraf*. Mila: Hugony Editore, 2011, p. 159-163. ISBN 978-88-904489-8-0.
4. Archaeology Data Service / Digital Antiquity. Guides to Good Practice. A: [en línia]. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: <http://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/Main>.
5. Puche, J.M. i Riera Rullan, M. Nuevas tecnologías y documentación gráfica profesionalizada en la arqueología d elas Islas Baleares. A: *I Congreso Nacional de Arqueología Profesional (CNaP)* [en línia]. Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y en Ciencias de Aragón, 2018,p. 277-285. Disponible a: https://www.academia.edu/36814625/Nuevas_tecnologías_y_documentación_gráfica_profesionalizada_en_la_arqueología_de_las_Islas_Baleares.
6. Andreu, P.G.-A. Paleolític i Epipaleolític al Garraf-Ordal. On érem, on som. A: M. Edo, A. Blasco i M. Villalba, ed., *La cova de Can Sadurní i la Prehistòria de Garraf* [en línia]. Milano: Hugony Editore, 2011, p. 227-244. ISBN 978-88-904489-8-0. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: https://www.academia.edu/1472409/Paleolític_i_Epipaleolític_al_Garraf-Ordal._On_érem_on_som.
7. Martín, A. i Miret, M. Més d'un segle de recerques prehistòriques al massís de Garraf. A: M. Edo, A. Blasco i M. Villalba, ed., *La cova de Can Sadruní i la prehistòria al Garraf*. Milano: Hugony Editore, 2011, p. 167-187. ISBN 978-88-904489-8-0.
8. Edo, M., Blasco, A. i Villalba, M. La cova de Can Sadurní, guió sintètic de la prehistòria recent de Garraf. A: M. Edo, A. Blasco i M. Villalba, ed., *La cova de Can Sadurní i la Prehistòria de Garraf*. Milano: Hugony Editore, 2011, p. 13-95. ISBN 978-88-904489-8-0.
9. Edo, M. i Blasco, A. Un nou punt de coincidència amb l'arqueologia experimental: les estructures d'emmagatzament de Can Sadurní. Begues. A: *IX Col·loqui Int. Arqueologia Puigcerdà. Andorra* [en línia]. 1992, p. 109-111. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: https://www.researchgate.net/publication/285476212_Un_nou_punt_de_coincidencia_amb_l%27arqueologia_experimental_les_estructures_d%27emmagatzament_de_Can_Sadurni_Begues.
10. Edo, M. et al. Cova de Can Sadurní, la transformació d'un jaciment. L'episodi sepulcral del neolític postcardial. A: *Tribuna d'Arqueologia* [en línia]. 2016, Vol. 2013-2014, p. 81-105. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a:

https://www.researchgate.net/publication/316350390_Cova_de_Can_Sadurni_la_transformacio_d'un_jaciment_L'episodi_sepulcral_del_neolitic_postcardial.

11. Roosevelt, C.H. et al. Excavation is Destruction Digitization: Advances in Archaeological Practice. A: *Journal of Field Archaeology* [en línia]. 2015, Vol. 40, núm. 3, p. 325-346. ISSN 0093-4690. DOI 10.1179/2042458215Y.0000000004. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/2042458215Y.0000000004>.

12. Tingdahl, D. i Van Gool, L. A public system for image based 3D model generation. A: *Computer Vision/Computer Graphics Collaboration Techniques 5th International Conference, MIRAGE 2011* [en línia]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, p. 262-273. ISSN 03029743. DOI 10.1007/978-3-642-24136-9_23. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-24136-9_23.

13. Callieri, M. et al. Meshlab as a Complete Open Tool for the Integration of Photos and Colour with High- Resolution 3D Geometry Data. A: *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* [en línia]. Amsterdam University Press, 2012, p. 406-416. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: <https://core.ac.uk/display/37824809>.

14. Askey, P. Canon EOS 30D Review: Digital Photography Review. A: *Digital Photography Review* [en línia]. 2006. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: <https://www.dpreview.com/reviews/canoneos30d>.

15. Canon EF 24mm f/2.8: Digital Photography Review. A: *Digital Photography Review* [en línia]. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: https://www.dpreview.com/products/canon/lenses/canon_24_2p8/overview.

16. Hiestand, R. Regard3D. A: [en línia]. 2015. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: <http://www.regard3d.org/index.php>.

17. Lerma, J.L. et al. Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital Photorealistic 3D modelling by photogrammetry: laser scanning versus digital image Cuadernos de arte rupestre, 6, (2013): 85-90. A: *Cuadernos de Arte Rupestre* [en línia]. Centro de Interpretación de Arte Rupestre de Moratalla, 2013, Vol. 6, p. 85-90. ISSN 1699-0889. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/61249>.

18. Buill, F., Núñez, M.A. i Rodríguez, J.J. *Fotogrametría arquitectónica*. Barcelona: Edicions UPC, 2007. ISBN 978-84-8301-92-7.

19. Robertson, D.P. i Cipolla, R. Structure from Motion. A: M. Varga, ed., *Practical Image Processing and Computer Vision* [en línia]. John Wiley, 2009, ISBN 0470868546. Disponible a: <http://academic.research.microsoft.com/Search?query=structure+from+motion>.

20. Furukawa, Y. i Hernández, C. Multi-View Stereo: A Tutorial. A: *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision* [en línia]. Now Publishers, Inc., 2015, Vol. 9, núm. 1-2, p. 1-148. ISSN 1572-2740. DOI 10.1561/06000000052. [Consulta: 17 setembre 2018]. Disponible a: <http://www.nowpublishers.com/article/Details/CGV-052>.

21. Caner, H. et al. *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications*. 2008.

AGRAÏMENTS

A n'Amparo Núñez i en Felipe Buill, directors del Treball, pel seu suport i insistència.

A en Manel Edo i tot l'equip del CIPAG i Can Sadurní, per la seva disponibilitat, suport i paciència.

A en Jordi Martínez per la possibilitat de realitzar l'escaneig de la cova i la cessió de les dades de l'escàner làser.

ANNEXOS

Amb el treball d'adjunten les següents dades:

ANNEX 1 – Versió en català del resum i capítols 1 – 4.....	79
ANNEX 2 – Calibratge de càmera (Image Master Calib).....	97
ANNEX 3 – Coordenades i situació dels punts de recolzament a la zona de sitges.....	99
ANNEX 4 (format digital) – Dades	
A4.1. Zona de sitges	
A4.1.1. Fotografies de treball per a la zona de sitges (48 imatges SFM, 21 imatges CRP)	
A4.1.2. Llistat i situació de punts de suport	
A4.1.2. Model tridimensional Image Master (.obj) i calibratge de càmera.	
A4.1.3. Model tridimensional Photoscan (.obj)	
A4.1.4. Model tridimensional VisualSFM (.obj)	
A4.1.5. Model tridimensional Regard3D (.obj)	
A4.1.6. Arxiu de comparació de núvols (.bin)	
A4.2. Cova	
A4.2.1. Composició núvol de punts Estació Híbrida IS	
A4.2.2. Núvol de punts escàner làser Faro	
A4.2.3. Fotografies interior cova	
A4.2.3. Model tridimensional Photoscan (.obj)	
A4.2.4. Arxiu de comparació de núvols (.bin)	

ANNEX 1 – Versió en català del Resum i Capítols 1 - 4

RESUM

Ja fa temps que els sistemes de captura massiva de dades (SCM), tant basats en imatge com en mesures làser, es van desenvolupant acompanyats de l'evolució de la tecnologia digital i s'estan estenent en cada cop més àmbits. La cada cop major capacitat de processament dels ordinadors personals, l'aparició de nous algorismes de càlcul, el refinament dels aparells de captació i mesura i, en general, l'abaratiment dels productes tecnològics fan que aquests sistemes siguin cada cop més accessibles i vagin guanyant més àmbits d'aplicació.

En el camp de l'arqueologia, la documentació dels processos d'excavació és un apartat crític ja que aquests suposen el desmantellament del propi jaciment. L'única possibilitat de revisar, comprovar les dades o reinterpretar els resultats d'una excavació és, quasi exclusivament, la consulta de la documentació que es va realitzar en el seu moment.

Ja des del principi de la pràctica arqueològica com a disciplina científica la documentació gràfica (en forma de dibuix de plantes, seccions i detalls o fotogràfica) i el registre de la distribució espacial de les troballes (inicialment amb els mètodes de quadrícules) han tingut una importància destacada. La geomàtica ja porta molt de temps aportant les tècniques topogràfiques en el registre espacial dels elements i característiques dels jaciments.

Els SCM suposen una nova i valuosa eina complementària a aquests dos tipus de documentació. La migració dels processos fotogramètrics a l'àmbit digital i el desenvolupament de dispositius de mesura làser cada cop més precisos, eficients i flexibles, possibiliten la creació de models tridimensionals digitals fotorealistes que uneixen una acurada reproducció gràfica i geomètrica, i estan referenciats a la seva ubicació original. Aquests permeten revisar i reproduir els diferents estats d'excavació del jaciment i la situació i context original de les diferents troballes localitzades, amb la possibilitat de consultar-hi coordenades i realitzar-hi amidaments, i sense la restricció d'una escala fixa, un punt de vista determinat, ni la selecció d'uns detalls respecte d'altres.

És sabut que els equips d'excavació arqueològica acostumen a treballar amb uns pressupostos molt limitats, i per això aquest treball intenta cercar vies d'utilització dels SCM el més assequibles possibles per mostrar que qualsevol projecte arqueològic, per modest que sigui, pot integrar-los en el seus processos de documentació. En aquest sentit, els SCM basats en imatge centren el present treball ja que són els que més a l'abast s'han situat, ja que els mètodes fotogramètrics s'han deslliurat de la dependència de cars aparells especialitzats i s'han aprofitat de l'aparició de programes de baix cost o inclús gratuïts.

En el treball s'han avaluat diversos recursos actualment disponibles, principalment de sistemes basats en la imatge, de diferents característiques i provinents tant del sector comercial com de l'àmbit acadèmic o de recerca. Per a això s'ha realitzat una aplicació pràctica en condicions reals al jaciment arqueològic de Can Sadurní, al TM de Begues, que ha permès veure com treballen i quins resultats se n'obtenen. La intenció és construir una imatge de l'estat actual de disponibilitat d'aquests sistemes, incidint especialment en que siguin el màxim d'assequibles i accessibles, tant en termes econòmics com d'utilització, per a la seva màxima integració en els mètodes arqueològics.

1. INTRODUCCIÓ

L'arqueologia es defineix, segons el diccionari de l'Institut d'Estudis Catalans, com la ciència que estudia la història de la humanitat a partir de les restes materials que aquesta ens ha deixat.

La pràctica de l'arqueologia s'inicia al final del segle XIX. Poc a poc, l'arqueologia ha anat creant les metodologies per a l'extracció del màxim d'informació dels jaciments estudiats, per tal de convertir aquesta en coneixement, i és a mitjans del segle XX quan aquestes estan prou establertes per considerar-la una disciplina científica. Entre les eines principals que utilitza per a l'extracció d'informació d'aquestes restes hi ha l'excavació dels jaciments. Aquest procés és una activitat destructiva, i per definició, sense repetibilitat (una de les característiques principals del mètode científic).

L'objectiu de l'excavació és l'aportació d'informació al registre arqueològic sobre el conjunt d'indis localitzats al jaciment, formats per tres tipus d'elements: els artefactes (qualsevol estri de manufactura humana), els ecofactes (qualsevol resta orgànica) i les estructures (restes de construccions). És a partir de les dades del registre i mitjançant la interpretació d'aquestes que es podran realitzar hipòtesis de coneixement per a l'explicació dels fets i condicions del passat.

Aquestes dades, a més, s'alimenten dels registres arqueològics d'altres jaciments similars en l'espai i el temps, sent habitual que, a la llum de noves troballes, calgui revisar la informació obtinguda, tant per a la reinterpretació del propi jaciment com d'altres que comparteixin algunes de les seves característiques, per la qual cosa la documentació de les tasques d'excavació és fonamental, ja que com s'ha comentat, els jaciments són destruïts durant els processos d'excavació, sense possibilitat, doncs, de revisació o reexcavació.

Per a la captura de la màxima quantitat d'informació els arqueòlegs se serveixen d'un gran nombre d'especialistes en diverses matèries, que amb els coneixements de les seves respectives disciplines poden ampliar les fonts i complementar el context de les dades pròpies de l'arqueologia.

Des del moment que es comencen a aplicar metodologies científiques, es va començar a considerar d'interès conèixer la distribució espacial de les troballes i es va iniciar el seu enregistrament, originalment mitjançant el mètode de quadrícules de Wheeler (1930). Aquest enregistrament va anar evolucionant i depurant-se amb els mètodes Laplace-Meroc (1954, i el més extès), Van Giffen (1958), i més recentment el mètode de la matriu de Harris (1975-80, actualment també molt estès). Més recentment s'ha estès l'ús de l'estació total com a mètode per posicionar les troballes que van apareixent, sovint com a eina complementària a les quadrícules, o també independentment d'aquesta, aportant més flexibilitat a l'hora d'excavar.

L'àmbit de la geomàtica ha continuat aportant eines a l'elaboració del registre arqueològic (i a d'altres aplicacions) amb la irrupció de noves tecnologies de la mà del desenvolupament del món digital. La possibilitat de crear models tridimensionals georeferenciats (mitjançant mesures d'escàners làser o a partir d'imatges) que complementin la documentació del procés d'excavació i posteriors anàlisis i aportin material audiovisual per a la divulgació, s'ha anat estenent i sovint simplificant i fent més assequibles. Però, com és

habitual, la inclusió d'aquestes tecnologies sempre acostuma a ser lenta. Com s'ha dit, l'arqueologia se serveix de moltes disciplines, i totes es troben en constant evolució.

Aquest treball intenta aplicar i donar a conèixer algunes tècniques de reproducció 3D digital dins l'activitat d'excavació, buscant i difonent metodologies el més simples i assequibles possibles, i mostrant-ne el seu ús amb una aplicació pràctica per tal d'anar sistematitzant-ne el seu ús en les tasques de creació del registre.

2. DOCUMENTACIÓ GRÀFICA EN ARQUEOLOGIA

Com s'ha exposat, per a l'aportació de dades al registre arqueològic és habitual la el sacrifici de les condicions de troballa en el jaciment, el que fa impossible revisitar-lo *a posteriori* per al seu reestudi si fos necessari actualitzar hipòtesis a la llum de noves descobertes. És per això que la documentació del registre respecte del moment d'extracció de les troballes és essencial per obtenir totes les dades possibles sobre cada artefacte, estrat, estructura... que permetin donar-li el màxim context en el moment de la seva troballa. Davant d'una troballa, és més important la recopilació de tota la informació disponible que la seva interpretació, ja que aquesta és susceptible de poder canviar amb el temps, però la informació que es pugui perdre en aquest moment serà ja irrecuperable.

La documentació pot ser literal, gràfica, geogràfica (descripció, com és, on és, quines característiques té cada troballa realitzada)... i serà aquesta bona documentació la que permetrà integrar les peces en el discurs general del jaciment (3), així com l'intercanvi d'informació entre jaciments, creant sinergies que permetin enriquir les hipòtesis de coneixement i establir-ne interaccions.

Tot i que el procés de documentació no està totalment estandaritzat, si que existeixen guies de bones pràctiques en documentació, emmagatzematge i creació de repositoris digitals d'intercanvi, com el de *l'Archaeology Data Service*, de la Universitat de York en col·laboració amb *The Digital Archaeological* (4), que actuen també per si mateixos de repositori d'emmagatzematge i intercanvi.

La documentació gràfica ha consistit, majoritàriament, en la realització de dibuixos, en forma de planimetries i seccions totals o parcials del jaciment en els diferents estrats (a escales 1/500 - 1/50), o de detall dels artefactes trobats (1/50 - 1/1) i cada cop més en forma de fotografies.

El dibuix arqueològic fa una síntesi, no només una descripció, del que està representant, El dibuix aporta coneixement en si mateix, ja que el dibuixant interpreta el que veu, destacant uns elements sobre uns altres. Si per una banda això realça els fets interessants del què es dibuixa, també pot estar ometent altres detalls que, posteriorment i a la llum de nous descobriments, podrien haver aportat encara més coneixement.

El dibuix a escala, i en coordenades, permet, a més, mesurar i concretar exactament on era cada element en relació als altres, aportant documentació també geomètrica.

La fotografia, en canvi, és objectiva, no interpreta. Això pot fer que es puguin passar per alt detalls a priori, però que es puguin recuperar a posteriori. No permet, però, per si mateixa, la mesura ni coneixement de la ubicació exacta dels elements, per tant la capacitat de recuperació d'informació queda limitada en aquest aspecte, i depèn, a més, del punt de vista des d'on s'ha pres, mostrant o ocultant detalls determinats.

L'aparició del món digital i la seva cada cop major extensió ha aportat noves eines que poc a poc van introduint-se en l'àmbit arqueològic que presenten un potencial (sovint encara poc explorat) per a aprofundir en la conservació, anàlisi i difusió d'informació valuosa. Les bases de dades, SIG (sistemes d'informació geogràfica), i imatge digital, així com també evidentment les eines de comunicació i distribució d'informació, signifiquen un avanç important en l'assoliment de coneixement, complementant les eines clàssiques utilitzades fins ara.

En el cas concret del present treball, la captura massiva de dades per a la construcció tridimensional de models digitals de la realitat, a partir d'imatges o la presa de mesures làser,

permet la realització d'“instantànies” del procés d'excavació, és a dir la reproducció acurada de les diferents fases d'excavació, de manera massiva, les quals poden ser revisitades per a posteriors anàlisis tantes vegades com es vulgui, entre d'altres aplicacions.

Aquests models digitals tridimensionals aporten:

- Instantànies dels diferents estats d'excavació.
- Captura massiva de dades (la interpretació es fa a posteriori i es pot reproduir tantes vegades com calgui des de diferents punts de vista).
- Són mètriques: s'hi poden realitzar mesures, i també es poden relacionar respecte d'altres models (això requereix l'escalat i georeferenciació del model en el moment de presa de dades i processat).
- Tenen textura: la “pell” del model conté imatge, i per tant s'hi poden identificar els diferents elements i algunes de les seves propietats.
- No estan totalment restringits a una escala o punt de vista fixos.

Aquestes eines, però, porten actualment associades una sèrie de requeriments i problemàtiques a tenir en compte, sobretot d'aspecte pràctic:

- Maquinari i programari de suport per a la seva obtenció, processat, consulta i anàlisi.
- Formats digitals (es podrà llegir en el futur? Continuaran estant disponibles el programari i maquinari necessari?)
- Suports d'emmagatzematge i el seu manteniment (els arxius resultants acostumen a tenir mides considerables i a més s'hauran de mantenir durant llargs períodes de temps).

Si bé el dibuix requereix d'interpretació i, per tant, l'ull de l'arqueòleg és difícilment substituïble en la tria dels detalls a representar, la creació de models 3D, al ser una presa de dades massiva i indiscriminada, pot ser, i sovint és realitzada per tècnics externs al món arqueològic (5). Cal, això si, una bona comunicació i l'entesa entre l'equip arqueològic i el tècnic per tal de triar els moments idonis i preparar l'espai i metodologies per a la presa d'aquests. De totes maneres, també es pot optar per una realització compartida d'aquestes tasques, ja que aquestes es divideixen, en el cas de modelització a partir d'imatge, en una presa de fotografies, que amb l'assessorament necessari pot realitzar, a conveniència, el propi equip d'excavació, i la realització de mesures geomètriques per a la georeferenciació i processat del conjunt de dades per a l'obtenció del model que pot ser realitzat *a posteriori* per personal especialitzat.

Per altra banda també cal assumir que lamentablement, sovint la pràctica de l'arqueologia ha de fer front al maneig de pressupostos extremadament ajustats per a la realització de la seva activitat.

És per tot això, per tant, que una part essencial d'aquest treball serà la recerca de metodologies de treball, que, sent el màxim d'eficients possible, siguin també el màxim d'asequibles tant en l'aspecte econòmic com en simplicitat d'ús per part de personal no expert en geomàtica, intentant maximitzar així el seu abast i possibilitat d'implementació. En aquest aspecte, la fotogrametria digital és la que més potencial presenta, alliberada de la necessitat de dependre de costosos aparells especialitzats i amb l'aparició de programari de baix cost i inclús lliure per al seu processat.

3. ARQUEOLOGIA AL GARRAF

En el massís del Garraf-Ordal hi ha evidències d'ocupació humana des de temps prehistòrics. El massís, a cavall de les comarques del Baix Llobregat, Garraf, Alt Penedès i Baix Penedès, està limitat entre el curs del riu Llobregat i la seva plana deltaica, la plana prelitoral interior i el litoral marí, fins Calafell.

Degut a que l'interior del massís ofería poques terres conreables, els assentaments es van concentrar a les vessants i peus d'aquest, territoris que posteriorment serien intensament explotats i transformats, la qual cosa va fer desaparèixer la majoria de vestigis arqueològics a l'exterior.

La formació càrstica del massís, però, ofería nombrosos abrics i coves per a establir-s'hi, i són aquestes cavitats les que han preservat un valuós testimoni de l'ocupació humana des de temps antics. Les coves de Can Sadurní a Begues, del Gegant a Sitges, del Rinoceront a Castelldefels, de la Pesseta a Torrelles de Foix, Foradada a Calafell i d'altres que tot just ara es comencen a estudiar s'han convertit en jaciments que, en conjunt, van formant una idea de les cultures dels antics habitants d'aquestes contrades. A més sembla lògic pensar que aquests jaciments estan relacionats entre ells, amb poblacions que es desplaçaven i intercanviaven entre elles, fent de l'àrea una zona intensa en interaccions. El fet singular de l'abundància de cavitats aptes per ser emprades ha convertit el Garraf en una zona arqueològica de primer ordre, tot i que no ha sigut fins a finals del segle XX (6) que es reconeixen jaciments prehistòrics i se'n comença a fer un estudi seriós i sistemàtic. Les restes estudiades abarquen un arc temporal que s'estén des dels 49000 anys BP fins als nostres dies.

L'estudi arqueològic del Garraf s'inicia a finals ja del segle XIX (7) (temps en el que s'origina l'interès per les troballes arqueològiques), de la mà de l'excursionisme i la Renaixença, però en aquella primera època només es cercaven peces col·leccionables que passaven a ser propietat del descobridor, i per tant va ser una etapa d'excavació i espoli, sense pràcticament documentació, fet que malmeté parcialment gran nombre de jaciments. No és fins als anys 30 que es promulguen lleis que remarquen l'interès científic dels béns paral·lelament a l'aparició de les primeres metodologies de camp d'orientació científiques, tot i que encara no estaven ben assentades. A les dècades dels 40 a 60 s'estenen els estudis científics a la zona, però no és fins els anys 70 que la metodologia general de treball de camp millora a través de recerques amb recolzament universitari, i amb l'aportació d'altres disciplines científiques. És a partir de l'any 78, amb l'estudi de les Mines de Can Tintorer (Gavà) i de la Cova de Can Sadurní (Begues), amb Josefa Villalba, Manel Edo i Manel Alonso al capdavant, i amb el recolzament del Dr. Joan Maluquer, que s'inicien els primers projectes de recerca prehistòrica holocènica del Garraf de llarga durada.

Actualment al Garraf hi ha més de 500 jaciments catalogats, dels quals més de 120 són prehistòrics (dels més de 4000 que hi ha a Catalunya), tot i que com s'ha comentat molts van ser espoliats a les primeres èpoques.

3.1. La Cova de Can Sadurní

La cova de Can Sadurní (8) està ubicada en el terme de Begues, a la comarca del Baix Llobregat, en els terrenys de la masia Can Sadurní, de la qual pren el nom, a una alçada d'uns 420 m sobre el nivell del mar. Forma part del poljè de Begues, en la seva part més alta. La Vall

de Begues ha estat una cruïlla de camins i la cova n'és la més ben situada, en un punt estratègic de comunicacions, i amb terres cultivables i aigua disponible properes.



Il·lustració 3-1. Ubicació del jaciment de Can Sadurní, al terme municipal de Begues (font ICGC)..

El jaciment consta d'una terrassa exterior i una cavitat natural, de formació càrstica, que és el desaigüe natural de la dolina que forma la terrassa.

La terrassa exterior forma pràcticament un cercle, la meitat del qual està format per les parets calcàries on hi ha l'obertura de la cavitat, al N-NE, i té una extensió d'uns 325m². És a la terrassa on es troba l'excavació on hi havia un conjunt de sitges d'emmagatzematge que ha servit per a la realització de la primera part d'aquest Treball Final de Grau.

Durant la campanya de 1978 van aparèixer tres estructures d'emmagatzematge excavades directament en la plataforma sedimentària en l'excavació d'una cala. Aquestes tenen forma circular i bases arrodonides, amb diàmetres del voltant d'1 m i 0.75 m de profunditat. La magnitud d'aquestes, la seva ubicació i els indicis d'haver servit per conservar-hi gra gra fan pensar que en aquell moment hi havia una ocupació de la cova (9).



Il·lustració 3-2. Cova de Can Sadurní: a primer terme la terrassa, amb la zona de sitges a la dreta, i al fons l'entrada actual.

La cavitat, on s'ha realitzat la segona part del treball i que actualment té una entrada artificial des de 1851, quan fou tancada per la Comandància Militar de Molins de Rei, presenta una gran sala d'uns 190m², allargada amb un vèrtex en direcció N-NE, amb una longitud d'uns 20 m i una amplada d'uns 15, i 5 m d'alçada respecte la cota inicial d'excavació. Els sediments estan disposats en forma de con de sedimentació des de l'entrada de la cova, com s'ha dit desaiçue de la terrassa exterior, fet que condiciona la disposició estratigràfica en el registre de l'excavació.

Tot i que en un moment inicial, davant l'evidència de que la cova havia estat ja excavada i s'hi havia remogut terres, la viabilitat del jaciment per oferir material verge excavable no era clara, els primers estudis van mostrar que sota la terra remoguda existia encara una gran quantitat de sediments que no havien estat alterats, de manera que es van tirar endavant les tasques d'excavació (10). Aquestes s'han estat realitzant des de l'any 1978, amb una pausa entre els anys 1983-1992, liderades sempre pel CIPAG (Col·lectiu per a la Investigació de la Prehistòria i l'Arqueologia del Garraf-Ordal) i dirigides per Manel Edo, Anna Blasco i M^a Josefa Villalba, sota l'empara de la Universitat de Barcelona, amb la col·laboració de l'Ajuntament de Begues. A la cova s'hi estan excavant actualment 51 quadres, que inclouen un sondeig de 4 quadres que ha servit per a identificar i codificar capes (l'estratigrafia funciona a partir de la classificació dels sediments en estrats) per a l'excavació de la resta.

Les primeres capes, més superficials, corresponen a treballs de terraplenat i visites incontrolades realitzades en els darrers 50 anys. És a partir de la capa 4 que es troben els materials intactes, des del segle II DNE fins l'edat moderna. Per sota d'aquesta es va progressant enrere en el temps, pràcticament sense pausa, fins la capa 21, datada al voltant del 10500 ANE.

Per tant, la cova aporta dades sobre la prehistòria que abarquen des d'una primera etapa situada en l'Epipaleolític microlaminar, i s'estén per l'Epipaleolític geomètric, el Mesolític, el Neolític antic (cardial ple, cardinal final i Epicardial), el Neolític mitjà (Postcardial), i el Final-Calcolític, fins l'Edat de Bronze, amb troballes singulars, com diferents episodis sepulcrales, l'anomenat Encantat de Begues (l'estatueta prehistòrica més antiga que es coneix a Catalunya, de ceràmica, datada cap al 4500 ANE), o les evidències d'elaboració i consum de cervesa que, a hores d'ara, suporta la més antiga d'Europa, datada cap al 4300 ANE.

En paral·lel a les tasques d'excavació, s'ha anat treballant en altres aspectes, com la protecció, consolidació i condicionament del jaciment amb la instal·lació de bastides, remodelació d'accessos, tancament perimetral o l'adequació del camí d'accés i la terrassa. Actualment es treballa en el projecte *Can Sadurní Horitzó 30*, d'investigació prehistòrica i dinamització cultural, apostant per la divulgació del patrimoni històric del Massís del Garraf i la creació d'un Parc Arqueològic que exercirà de Centre d'Interpretació Prehistòrica de la cova de Can Sadurní.



Il·lustració 3-3. Cova de Can Sadurní: visita guiada a la part interior del jaciment, pimers dissabtes i .

4. CAPTURA MASSIVA DE DADES

Que l'excavació és destrucció", o si més no un "experiment irrepetible", són de les expressions més utilitzades pels arqueòlegs a l'hora d'incidir en la importància de la documentació, així com també el fet de considerar l'excavació com un procés, paral·lelament al de destrucció del jaciment, de creació de dades i informació (11). Són aquests conjunts de consideracions els que han fet que la introducció dels mètodes de captura massiva d'informació (gràfica i geomètrica) hagi anat guanyant molta tracció en els darrers temps, a l'hora que s'ha anat convertint en més accessible tant econòmicament com metodològica.

La captura massiva d'informació per a l'obtenció de models tridimensionals digitals es realitza fonamentalment de dues maneres: de forma passiva (basada en la imatge) o activa (mesures làser).

El primer mètode (passiu) es basa en l'extracció d'informació tridimensional a partir d'imatges 2D. La reconstrucció de les posicions 3D de cada píxel es realitza mitjançant l'aplicació de diferents càlculs, que inclouen primer els valors de calibratge de la càmera i posteriorment la identificació de parells de píxels comuns en imatges diferents per al càlcul de la posició de la càmera per a cada imatge i posteriorment, de cada punt que apareix a la imatge.

En el segon cas la captura es realitza mitjançant la mesura de distàncies i angles a la superfície, obtenint així la posició relativa (coordenades) de punts en l'espai (núvol de punts) des d'un aparell d'escàner làser. La captura massiva de punts permetrà tenir prou densitat per a la generació d'una superfície tridimensional. Finalment, per a la texturització de la superfície caldrà afegir valors d'imatge (obtinguda des d'ell mateix aparell o posteriorment).

Aquests dos grups principals de metodologies (imatge i mesures làser), es poden dividir al seu torn en subgrups, cada un d'ells com es veurà amb diferents característiques i condicionants que els acaben fent complementaris. Però a un primer nivell, els dos grups principals comparteixen un seguit de punts comuns (17):

- Els mètodes actius, a l'utilitzar aparells de mesura complexos, requereixen en general una major inversió per la necessitat d'utilitzar aparells especialitzats, programari també especialitzat i personal especialista en tots els passos, des de la presa de dades, processat fins a l'elaboració dels productes finals.
- Els mètodes passius en canvi, a l'utilitzar instruments més assequibles, requereix en general una inversió considerablement menor, tot i que també programari especialitzat i personal també especialista en tots els passos.

Finalment, ambdós mètodes requereixen de suport topogràfic per a la georeferenciació dels models tridimensionals.

El present treball, en la recerca de metodologies el màxim d'assequibles per a una introducció generalitzada en els fluxos de treball arqueològics de projectes d'excavació de qualsevol magnitud, es centrarà en les diferents eines que permeten la creació de models a partir d'imatges, tot i que es fa una petita ressenya de la resta de mètodes per a la seva consideració en situacions específiques.

4.1. MÈTODES BASATS EN LA IMATGE

Els mètodes basats en la imatge permeten extreure informació mètrica tridimensional a partir d'imatges bidimensionals solapades. Ja des de finals del sXIX, poc després de l'aparició de la fotografia, es va identificar aquesta possibilitat i es va iniciar el seu desenvolupament. Les tècniques i eines van anar evolucionant, però sempre depenent de costoses càmeres mètriques molt especialitzades i complexos aparells mecànics per a l'extracció d'informació. L'aparició des dels anys 60 d'ordinadors va permetre fer el salt de la fotogrametria analògica a l'analítica, alliberant la tècnica de la part mecànica per extreure la informació 3D dels parells d'imatges, i automatitzant els càlculs necessaris. Finalment, l'arribada de la fotografia digital ha permès migrar tot el procés als ordinadors, i la cada cop major capacitat de càlcul d'aquests ha permès també automatitzar enormement el processat d'imatges, la calibratge d'aquestes (eliminant també la necessitat de l'ús de càmeres mètriques) i l'extracció d'informació, simplificant notablement els passos a realitzar i fent molt més accessible aquesta metodologia a més àmbits i aplicacions. És notable en aquest aspecte l'aportació que ha fet el camp de la visió artificial en el camp de la visió estereoscòpica. A més, la creació de formats digitals de representació gràfica tridimensional ha permès l'aparició de nous productes que reproduïen fidedignament, amb alt detall i sense compromisos l'element representat, podent conservar tota la informació sense haver de limitar-se a determinats punts de vista o escales de representació.

Així doncs, actualment aquests mètodes utilitzen la informació digital gràfica continguda en arxius d'imatge (fotografies digitals) per a l'obtenció d'informació mètrica tridimensional. La base d'informació per a la realització d'un model 3D és, doncs, un conjunt d'imatges, preses des de diferent punts de vista i amb solapament entre elles de l'element que es vol modelitzar, ja sigui un objecte isolat, una part o conjunt del jaciment en un moment determinat... i les coordenades d'un conjunt de punts ben identificats i distingibles a les imatges per a la seva georeferenciació

A partir del conjunt d'imatges (cadascuna de les quals conté només informació bidimensional), que hauran de tenir uns requeriments determinats segons el mètode de processat que s'hi farà, es podrà calcular la posició tridimensional de cada unitat gràfica mínima puntual (píxel). El desplaçament de la posició relativa d'aquests entre les diferents imatges, degut al diferent punt de presa de cada fotografia, i coneguts els paràmetres de projecció i distorsió de la càmera, és el que permetrà obtenir-ne informació tridimensional. El conjunt de les posicions tridimensionals de cada píxel formarà un núvol 3D, on cada punt tindrà informació del seu posicionament relatiu respecte dels altres, així com informació del seu color. A partir d'aquest núvol serà possible, en el mateix paquet de programari o mitjançant eines complementàries, l'obtenció d'una malla triangular sobre la que s'hi podrà projectar, com a textura, la imatge original. Finalment, també dins el mateix paquet de programari o mitjançant eines complementàries, es podrà georeferenciar aquest model en el sistema de referència del jaciment identificant a les imatges els punts dels quals n'hem determinat les coordenades, obtenint així finalment reproduccions precises de cada estat d'excavació en les seves posicions originals, les quals serà possible superposar i comparar, així com la possibilitat de poder posicionar elements que en un primer moment podien haver passat per alt.

Hi ha dues metodologies principals per a l'obtenció dels models tridimensionals a partir d'imatge: la Fotogrametria d'Objecte Proper, o *Close Range Photogrammetry*, (CRP) que utilitza els mètodes clàssics de la fotogrametria aplicats a escenes situades a curta distància de la càmera, o el mètode *Structure From Motion*, (SFM), provinent del camp de la visió artificial, que aprofita les cada cop més elevades capacitats de càlcul dels ordinadors per a simplificar i flexibilitzar la presa de les imatges i processat d'aquestes. Tot i aquesta separació, els programes actuals sovint barregen solucions mixtes.

4.1.1. Fotogrametria d'objecte proper (CRP)

La CRP utilitza les mateixes metodologies generals de la fotogrametria, que des de finals del s. XIX permet la reconstrucció 3D a partir d'imatges 2D mitjançant el coneixement precís dels paràmetres de projecció de la càmera, aplicades a escenes properes, i es basa en l'obtenció d'imatges solapades i des de diferent punt de vista, la reconstrucció de les trajectòries dels feixos de llum des de l'objecte a la càmera, i el càlcul de la intersecció d'aquests feixos per a l'obtenció d'informació 3D, és a dir la reproducció tridimensional de l'objecte fotografiat (18).

La fotogrametria requereix, inicialment, d'un calibratge del conjunt lent-càmera, o orientació interna, per a poder reconstruir la trajectòria de cada feix de llum des de l'objecte al suport sensible de la càmera, tenint en compte les propietats geomètriques de la lent i les seves distorsions, i així poder reproduir-la a la inversa per determinar la posició inicial de cada element visible a la fotografia.

A l'hora de prendre les fotografies, una de les principals característiques de la CRP és que aquesta s'ha de realitzar en passades de desplaçament longitudinal, amb un generós solapament entre elles (aproximadament un 70% mínim), per tal que l'escena a representar aparegui en més d'una fotografia, és a dir les imatges són paral·leles entre elles per a cada passada.

Un cop és possible reconstruir aquesta trajectòria lineal cal conèixer la posició relativa de les càmeres entre elles en el moment de realitzar presa de les imatges (orientació externa). Per fer això cal identificar alguns punts comuns en dues imatges, crear-ne les trajectòries dels feixos i calcular els punts de projecció de les càmeres on coincideixin les interseccions d'aquests. Un cop situats els centres de projecció de cada imatge, serà possible, identificant tots els punts comuns en les imatges solapades, reconstruir els feixos de llum de cadascun i determinar-ne el punt d'intersecció d'aquests, obtenint així la posició 3D original. S'obté així, amb el conjunt d'aquestes posicions, el núvol de punts, que servirà de base per a la creació de la malla 3D, sobre la qual, a més, s'hi podrà projectar les imatges originals per a texturitzar-la.

El resultat final és doncs un conjunt de núvol dens de punts i malla triangular, amb la textura de les imatges utilitzades i en el sistema de coordenades del jaciment, que reproduïxen i documenten de forma acurada el seu estat en el moment de presa de les imatges, i sobre el que s'hi poden consultar coordenades i realitzar mesures, i que pot ser visionat des de qualsevol punt de vista. La característica principal de les solucions basades en fotogrametria clàssica és que requereixen l'ús d'una mateixa combinació de càmera lent en una distància focal constant, i la calibratge d'aquesta per determinar-ne les seves característiques geomètriques i distorsions amb una alta precisió (orientació interna).

4.1.2. Structure from Motion (SFM)

Arrel, com s'ha comentat, de l'augment de la capacitat de càlcul dels ordinadors, així com la generalització de l'ús de càmeres digitals i l'aportació del camp de la visió artificial, s'han desenvolupat algorismes que pretenen realitzar l'obtenció d'informació 3D d'imatges partint només del requeriment de tenir diverses imatges d'un mateix objecte, sense tenir coneixement de la posició ni característiques de la càmera (o inclús diferents càmeres), així com tampoc de coordenades terreny dels punts. A partir d'aquestes, amb les úniques condicions d'estar realitzades des de diferents punts de vista (és a dir movent la càmera al voltant de l'objecte), es pretén obtenir la calibratge i situació de la càmera, expressada per una matriu de projecció. Si bé no és imprescindible, si que és recomanable per facilitar les tasques de càlcul mantenir la mateixa combinació de càmera – lent i realitzar les fotografies el més ordenadament

possible. La teoria metodològica del SFM permet realitzar el càlcul d'aquests elements de projecció i distorsió de la càmera, la seva posició i direcció, i les coordenades 3D de punts (l'estructura del model 3D) en un sol càlcul, refinat utilitzant un ajust iteratiu d'alta redundància dels feixos de llum de punts comuns detectats automàticament en imatges solapades (*bundle adjustment*) (19). El resultat són els paràmetres de cada imatge (orientació interna i externa) i un conjunt de punts 3D visibles a les imatges.

Els passos a realitzar per a obtenir-ne el resultat són (20):

- Detecció d'elements 2D a cada imatge
- Identificació dels elements detectats entre diferents imatges i extracció de punts coincidents.
- Obtenció de coordenades 2D dels punts coincidents
- Solució 3D del model SFM a partir de les traces 2D
- Refinament del model SFM utilitzant un ajust *bundle adjustment*.

El primer pas, doncs és la identificació d'aquests punts comuns. El desenvolupament d'algorismes de *feature matching* o correspondència d'atributs, han automatitzat aquest pas identificant primer zones similars en imatges per després seleccionar punts singulars d'aquests, per exemple caracteritzats per un elements amb fort contrast (assumint que l'entorn d'un mateix píxel en dues imatges lleugerament diferents seran similars), com l'algorisme SIFT (2).

Per al càlcul de tots els paràmetres que permetran la reconstrucció de la posició dels píxels a l'espai, un cop detectats els punts comuns en les diverses fotografies, i tenint en compte que un mateix punt en dues imatges es troba, junt amb les seves projeccions i els centres de càmera en un mateix pla (pla epipolar), s'utilitza aquesta característica per restringir els possibles càlculs d'ubicació de les càmeres i obtenir-ne la posició relativa i característiques internes al parell.

Per a estendre aquest al conjunt del total d'imatges hi ha dues aproximacions possibles, començar per un parell i anar afegint-hi imatges (mètodes seqüencials) o compronent totes les imatges a la vegada (mètodes de factorització).

Els primers tenen l'avantatge de consumir menys recursos de càlcul, però tenen limitacions, per exemple requereixen que cada punt sigui visible en un mínim de tres imatges, la qual cosa pot dificultar la representació seqüències lineals llargues (com un mur o façana de carrer), a part de que hi ha situacions singulars en que els algorismes poden fallar (fotos preses des del mateix punt, sense translació de càmera, escenes planars, soroll en les mesures de correspondències de punts...) en el que els resultats dels càlculs poden degenerar. Caldrà una planificació acurada de la presa d'imatges per a evitar aquests possibles problemes.

En els segons el conjunt d'imatges es calcula a la vegada, de manera que hi ha un repartiment dels possibles errors i degeneracions de càlcul, no produint-se, en genera, errors grollers. Caldrà, però, igualment, una bona planificació de la presa d'imatges, ja que en aquesta aproximació cal que hi hagi punts que es vegin des de totes les imatges.

Posteriorment es realitza la densificació del núvol, amb l'execució d'algorismes MVS (Multi-View Stereo). Aquests algorismes pretenen la reconstrucció tridimensional a partir d'imatge (un cop conegudes les posicions de les càmeres), però, a diferència de la fotogrametria clàssica, amb imatges paral·leles o convergents a separacions i distàncies a l'objecte similars, el MVS pretén la reconstrucció a partir sovint d'un gran nombre d'imatges, i aquestes en posicions i direccions molt diferents. Un cop conegudes les posicions de les càmeres, però, la determinació 3D d'un punt que apareix en diverses imatges només cal calcular-ne la intersecció dels rajos. El problema que intenta resoldre l'algorisme MVS és el de la identificació

inequívoca d'un píxel d'una imatge en la seva línia epipolar d'una altra imatge, utilitzant per això estratègies de filtrat per evitar confusions pel soroll de la imatge, variacions d'il·luminació o color, o inclús per la presència d'oclusions que fan que en realitat no hi hagi píxel corresponent (mesures de fotoconsistència).

Cal tenir en compte que aquests algorismes tenen dificultats en superfícies especulars, poc il·luminades, en objectes molt fins o en superfícies sense textures o amb patrons repetitius.

4.2. MÈTODES BASATS EN MESURES LÀSER

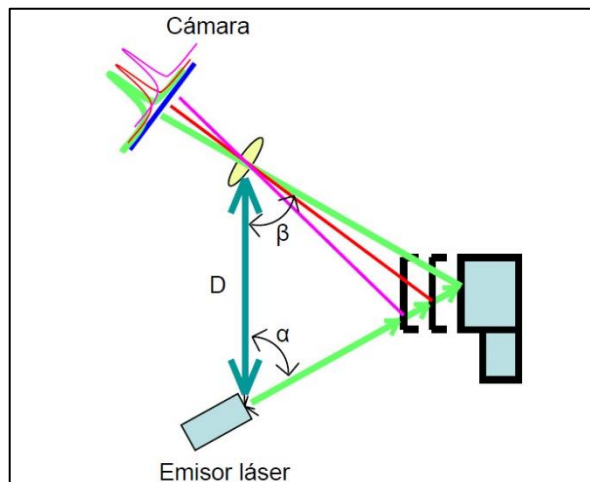
Una primera opció per a l'obtenció d'un model 3D seria, doncs, la mesura directa d'aquest mitjançant l'ús d'un escàner làser. Aquestes mesures, dites actives, es basen en l'emissió d'una radiació controlada, i en la detecció de la seva radiació per un receptor per a la mesura de la distància. Això, acompanyat del coneixement de la direcció del feix de radiació emès, permet el posicionament en l'espai de cada punt mesurat (21).

Hi ha, entre els mètodes de mesura activa, diferents aproximacions, que acaben responenent a diferents requeriments.

Els sistemes de mesura làser es poden dividir en dos de principals:

4.2.1. Per triangulació

En aquests, l'emissor i receptor (càmera) estan separats per una distància coneguda (base), així com l'angle de l'emissor respecte a aquesta base. Segons l'angle de recepció a la càmera, es pot resoldre un triangle i, així, la posició del punt mesurat. Alguns projecten patrons de llum per a la determinació més precisa de la superfície a representar. Aquest tipus d'aparells permeten precisions molt altes, del nivell de micres, però actuen a curta distància (d'uns 10 m màxim).



Il·lustració 4-1.: -Scheme of operation of a triangulation-based laser scanner (16).

4.2.2. Per temps de vol

Per pulsos: L'emissor emet un senyal i compta el temps de retorn d'aquest. Coneixent la velocitat de la llum en l'aire, és possible saber la distància a la que es troba el punt on el feix de llum ha rebotat. Per a la direcció, l'aparell consta d'un desviador del feix (reflector,

prisma...) per a la realització d'escombrades, i en registra la direcció a cada emissió del puls. Aquest tipus d'aparell aconseguixen un més llarg abast, de fins a alguns centenars de metres, però una menor precisió (de 6-10 mm) i resolució.

Per diferència de fase: Actuen de manera similar als de pulsos, però realitzen la mesura sobre la diferència de fase entre la senyal emesa i la rebotada. La utilització de diferents longituds d'ona permet anar refinant la mesura i augmentar l'abast més enllà de la longitud d'ona menor per a la precisió requerida. Aquests tenen precisions mitjanes de l'ordre de fins 1-2 mm mesurant a uns 10 m densitats també de fins a pocs mm a 10 m, i abast també mitjà d'uns 70 fins uns 300 m segons el model (evidentment la resolució i precisió del núvol de punts variarà considerablement amb la distància de treball, però en general són millors que els sistemes per pulsos, a canvi d'un menor abast).



Il·lustració 4-2: Exemples de làsers escàners (Faro i Riegl)

Darrerament s'han desenvolupat tecnologies que combinen ambdós mètodes (temps de vol del pols i anàlisi d'ona) per millorar l'abast i precisió de les mesures, així com instruments híbrids estació total / escàner, que combinen la possibilitat de fer petites escanejades a part del seu ús com a aparell de topografia.

La majoria d'aparells de làser escàner incorporen sensors d'imatge, els quals permeten crear una textura a superposar al model tridimensional, així com el programari necessari per al processat i formació dels models. Sovint requereixen de suport de topografia per a la determinació de coordenades de senyals de punteria (esferes, dianes...) que permetran georeferenciar el model en el sistema de coordenades del jaciment.

El principal inconvenient de les metodologies d'escàner làser per al treball en jaciments arqueològics són, com s'ha comentat, la inversió que requereixen en un ús sistemàtic (ja sigui en l'adquisició per compra o lloguer) per la dependència d'ús d'aparells especialitzats i la necessitat de personal especialista en tots els passos, des de la presa de dades fins el processat i realització de producte final, i per això no seran el centre d'interès principal d'aquest treball. Per altra banda, en determinats casos poden obtenir millors precisions, i no depenen tant de la il·luminació de l'escena a representar. Caldrà tenir en compte, però, que superfícies humides o reflectives poden donar problemes de mesura.

4.3. PROCESSAMENT DE DADES

Segons el mètode utilitzat, el flux de treball serà diferent. Per al present treball s'han triat eines representatives de cada flux per a obtenir una imatge de conjunt de les diferents possibilitats de treball, però en general, per als dos mètodes basats en imatge (CRP i SFM), les fluxos seran similars, amb variacions segons el programari utilitzat.

El programari per al processat de les imatges que s'ha utilitzat s'ha triat intentant incloure una mostra significativa de la disponibilitat actual, amb les seves diferents característiques, limitacions i, també, preu d'adquisició. Per una banda hi ha software propietari, creat per cases comercials, tancat, amb un enfocament professional i en general amb un millor acabat, funcionalitats més avançades i flux de treball més clar, però també sovint amb preus elevats.

Per altra banda hi ha programari lliure, realitzat en institucions acadèmiques o en el seu entorn, que utilitzen eines a l'abast dels desenvolupadors que ho desitgin. Sovint no cobreixen tots els passos fins a l'obtenció de la malla texturitzada del model 3D, havent d'utilitzar eines externes, no acostumen a tenir gaire suport tècnic, i hi ha el risc que el seu desenvolupament quedi interromput. Per altra banda, el seu cost és molt baix o nul, alguns permeten la personalització (codi obert), o tenen comunitats d'usuaris que generen documentació o fòrums de suport.

A continuació hi ha un quadre resum del software utilitzat i les seves característiques:

Programa	Autor	Codi	Núvol	Malla + textura	Georef.	Preu aproximat
Image Master	Topcon	Propietari	No	Si	Si	~3000€
Photoscan Pro	Agisoft	Propietari	Si	Si	Si	3000€
Photoscan Standard	Agisoft	Propietari	Si	Si	No	150€
VisualSFM	Changchang Wu	Obert	Si	No	No	Gratuït
Regard3D	Roman Hiestand	Obert	Si	Si	No	Gratuït
Arc3D	ESAT (KUL)	Propietari	Si	Si	No	Gratuït

Taula 4-1. Software fotogramètric utilitzat, característiques.

4.3.1. Mètodes basats en imatge: CRP

Com s'ha descrit en l'apartat explicatiu (4.1.1), el flux de treball per als programes CRP es pot resumir en els passos:

1. Orientació interna: calibratge de les propietats geomètriques del conjunt càmera objectiu per a una determinada distància focal, així com les seves distorsions.
2. Implantació de punts de referència, dels quals se n'obtenen les coordenades topogràfiques en el sistema de referència que s'utilitzi al jaciment i que hauran de ser identificables a les imatges.
3. Presa d'imatges, en passades de desplaçament lineal solapades que incloguin tot l'element que es vol representar, mantenint les condicions amb les que s'ha calibrat la càmera.
4. Orientació externa: Identificació de punts comuns en parells de fotografies i càlcul de la posició de les càmeres al moment de presa de les imatges. Utilitzant els punts de recolzament la resta del procés ja quedarà georeferenciat.
5. Identificació i creació de línies de trencament, si s'escau, prèvies al modelatge.
6. Creació d'una malla triangular 3D a partir del núvol de punts.
7. Texturització del model amb la projecció de les imatges originals.
8. Exportació del model, en el format adient per al seu ús o arxiu.

El programari amb una orientació més propera al CRP del que s'ha disposat ha estat Image Master, de la casa comercial Topcon.

4.3.2. Mètodes basats en imatge: SFM

En el cas del mètode SFM el flux de treball es pot resumir en els següents passos:

1. Implantació de punts de referència, dels quals se n'obtenen les coordenades topogràfiques en el sistema de referència que s'utilitzi al jaciment i que hauran de ser identificables a les imatges.
2. Presa d'imatges, des de punts de vista diferents, amb solapament (mínim cada punt ha d'aparèixer en tres imatges), i amb una mateixa combinació càmera-lent.
3. Algorisme de detecció de punts comuns.
4. Reconstrucció de la posició de les càmeres i núvol de punts comuns, amb el càlcul dels seus paràmetres i distorsions.
5. Bundle adjustment.
6. Densificació del núvol de punts 3D.
7. Creació d'una malla triangular 3D a partir del núvol de punts.
8. Texturitització del model amb la projecció de les imatges originals.
9. Georeferenciació
10. Exportació del model, en el format necessari per al seu ús o arxiu.

El pas de calibratge prèvia de la càmera és opcional, i es pot realitzar i introduir en diferents programes, simplificant els càlculs del pas 4, i en alguns programes els punts 3 i 4 s'ajunten en un sol pas de cara a l'usuari. També hi ha programes que permeten la definició de màscares d'ocultació en parts d'imatges que contenen elements externs a l'escena o en moviment, pas que es realitzaria abans del punt 3.

Darrerament han aparegut nombrosos programes de fotogrametria basats en SFM, tant comercials com d'entitats acadèmiques o el seu entorn. La publicació en codi obert de diferents algorismes de càlcul ha permès que diversos autors n'hagin desenvolupat, de manera que la majoria dels programes utilitzats treballen amb aquest mètode.

Els programes utilitzats han estat:

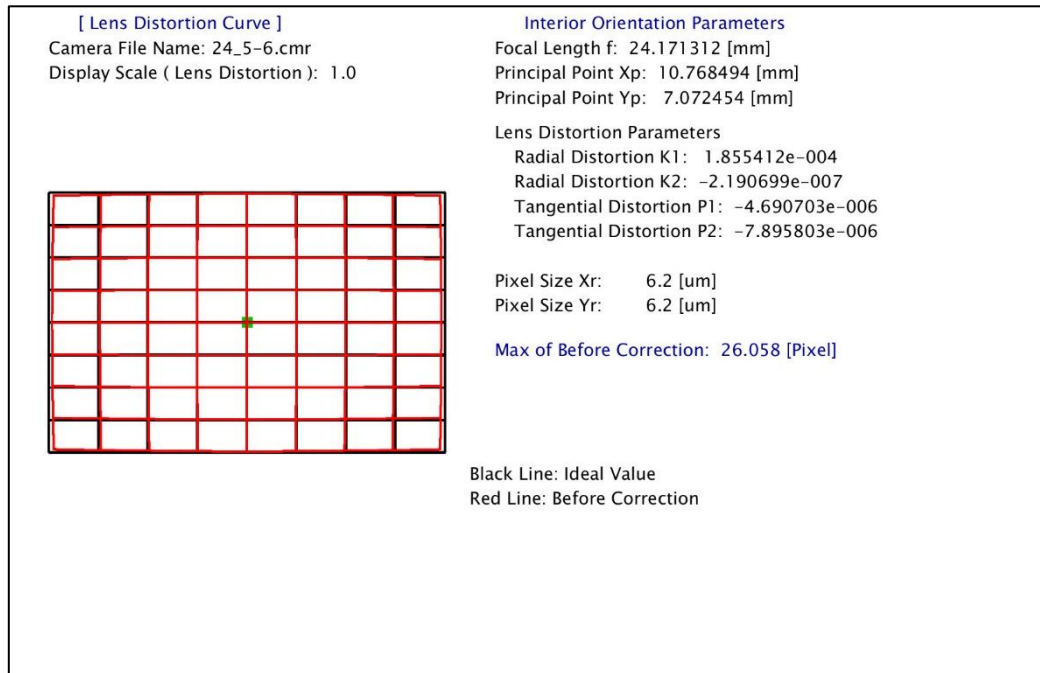
- **Photoscan** (en versió Standard i Pro), de la casa comercial Agisoft
- **VisualSFM**, de Changchang Wu
- **Regard3D**, de Roman Hiestand
- **Arc3D** del grup de recerca Processing Speech and Images (PSI) dins el Department of Electrical Engineering (ESAT) de la Katholieke Universiteit Leuven.

Els programes utilitzats no sempre cobreixen tots els passos descrits (Taula 4-1). Tots arriben a crear el núvol de punts, però en alguns cal utilitzar eines externes per acabar els últims quatre passos. Per a aquests últimes etapes (creació de la malla triangular amb textura i georeferenciació) s'ha utilitzat els següents programes complementaris:

- **Cloud Compare**
- **Meshlab**

ANNEX 2 – Calibratge de càmera (Image Master Calib)

Resultat de calibratge de la càmera utilitzada (Canon 30D + objectiu Canon 24 mm F2.8) amb el programa Image Master Calib.



Il·lustració A1-0-1. Image Master Calib, informe de calibratge de càmera.

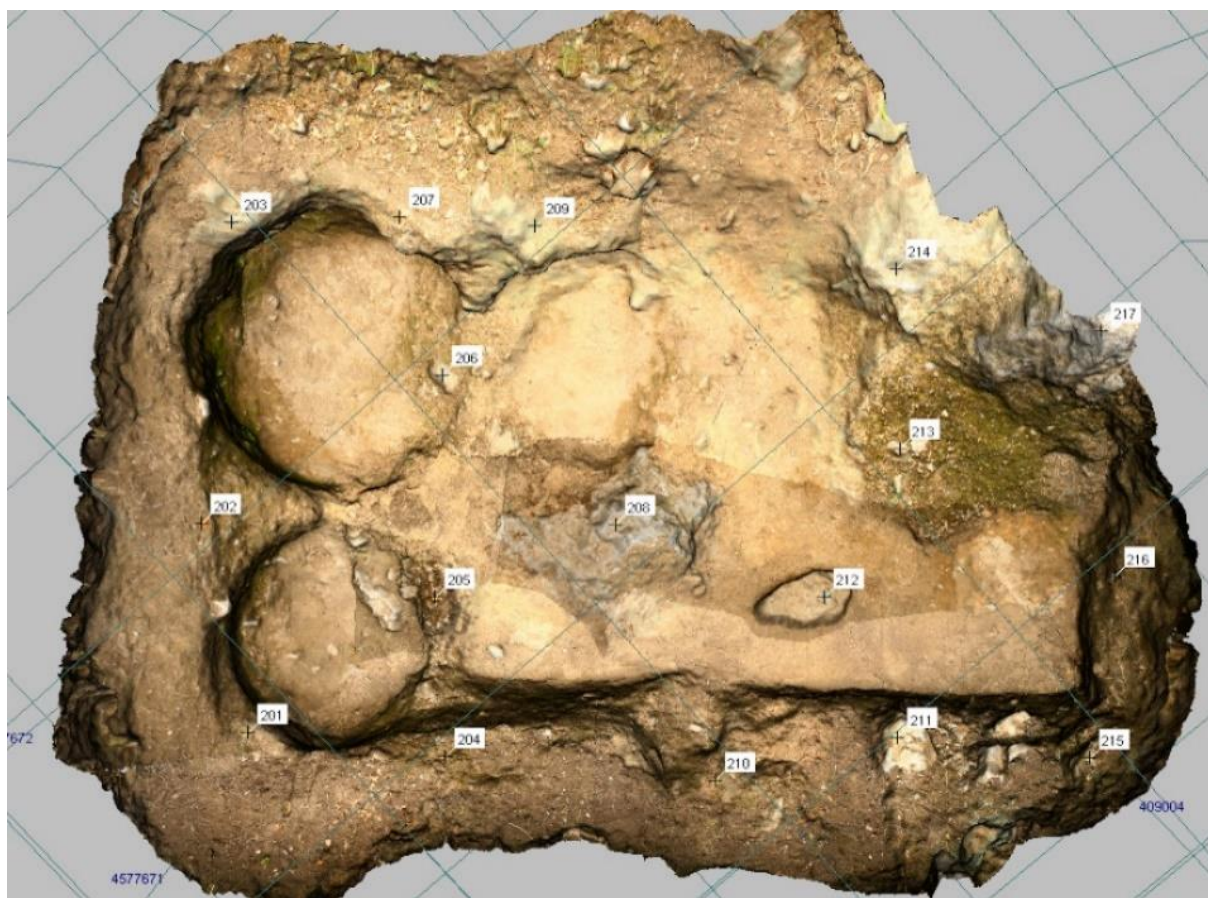
ANNEX 3 – Coordenades i situació de punts de recolzament a zona de sitges.

A3.1. Coordenades de punts de recolzament:

201,409001.236,4577671.334,419.375,G	210,409002.634,4577669.827,419.392,G
202,409001.734,4577672.144,419.445,T	211,409003.362,4577669.454,419.406,T
203,409002.718,4577672.972,419.563,B	212,409003.504,4577670.037,418.985,B
204,409001.839,4577670.698,419.469,T	213,409004.200,4577670.351,419.091,T
205,409002.198,4577671.222,419.126,G	214,409004.667,4577671.004,419.386,B
206,409002.871,4577671.943,418.968,B	215,409003.927,4577668.912,419.605,G
207,409003.237,4577672.548,419.397,T	216,409004.532,4577669.348,419.312,B
208,409003.027,4577670.940,419.146,G	217,409005.044,4577670.357,419.972,G
209,409003.635,4577672.149,419.322,G	

(El codi representa el color del punt per a la seva identificació: G–groc, T–Taronja, B–Blau)

A3.2. Situació:



Il·lustració A2-0-2. situació dels punts de recolzament a la zona de sitges, sobre el model d'Image Master..